

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Panić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Goran Šagi, dipl. ing.

Student:

Ivan Panić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, doc.dr.sc. Goranu Šagiju, na iskazanom povjerenju, stručnoj pomoći, strpljenju te velikoj potpori tijekom izrade rada.

Također se zahvaljujem i svojoj obitelji koja mi je tijekom cijelog studija bila velika podrška.

Ovaj završni rad posvećujem svome sinu Luki.

Ivan Panić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Panić**

Mat. br.: 0035190585

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Električni autobus za javni gradski prijevoz**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Electric bus for public transport**

Opis zadatka:

Imajući u vidu potrebe tržišta, obveze smanjenja emisija stakleničkih plinova i energetske učinkovitost koja sve više dobiva na značaju posljednjih godina, u ovom radu potrebno je razmotriti koncept gradskog autobusa s električnim pogonskim sustavom.

U okviru završnog rada potrebno je:

- Prikazati primjere autobusa namijenjenih javnom gradskom prijevozu u svijetu (naglasak staviti na Europu) s električnim pogonskim sustavom, pri tome navesti karakteristike pogonskog sustava.
- Napraviti pregled ispitnih ciklusa (engl. *driving cycle*) pogodnih za gradske autobuse.
- Analizirati i odrediti energetske potrebe gradskog autobusa s električnim pogonom za standardne ispitne cikluse (npr. gradski dio NEDC i WLTP ciklusa) i ispitne cikluse za autobuse (npr. Braunschweig, TNO, i sl.) i to za broj sati koji autobusi provedu u prometu tijekom jednog dana.
- Na temelju energetske potrebe odrediti karakteristike pogonskog sustava: karakteristike elektromotora (brzina vrtnje, snaga, moment), baterija (tehnologija, kapacitet, masa, volumen).
- Proračunati performanse gradskog autobusa s električnim pogonom: ubrzanje, svladavanje uspona i sl.

Pri izradi se treba pridržavati uobičajenih pravila za izradu završnog rada. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:
1. rok: 24. veljače 2017.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obran
1. rok: 27.2. - 03.03. 201
2. rok (izvanredni): 30. 06. 201
3. rok: 25.9. - 29. 09. 201

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Šagi

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. PRIMJERI BATERIJSKIH ELEKTRIČNIH AUTOBUSA U EUROPI.....	4
2.1. BYD K9	4
2.2. Solaris Urbino 12 Electric.....	5
2.3. Volvo 7900 Electric	7
2.4. Električni pogonski mostovi	9
2.5. Načini punjenja baterija	10
2.5.1. Punjenje preko utičnice (engl. Plug-In)	10
2.5.2. Oportunitetno punjenje (engl. Opportunity charging)	10
3. PREGLED ISPITNIH VOZNIH CIKLUSA POGODNIH ZA GRADSKE AUTOBUSE.....	12
3.1. Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus.....	13
3.2. Ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange	14
3.3. TNO ispitni vozni ciklus za autobuse	15
3.4. ETC ispitni vozni ciklus.....	16
3.5. NEDC ispitni vozni ciklus	17
3.6. WLTP ispitni vozni ciklus	18
4. ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA ELEKTROMOTORA	20
4.1. Karakteristike autobusa.....	20
4.2. Otpori vožnje.....	21
4.2.1. Sila otpora zraka	22
4.2.2. Sila otpora kotrljanja.....	22
4.2.3. Sila otpora uspona.....	22
4.2.4. Sila otpora ubrzanja	23
4.2.5. Vučna sila, potrebna snaga i moment na kotačima.....	23

4.3. Potrebna snaga elektromotra	23
4.3.1. Najveći uspon.....	24
4.3.2. Najveća brzina.....	24
4.4. Odabir elektromotora	24
4.5. Transmisija.....	25
4.5.1. Prijenosni omjeri dvostupanjskog mjenjača	26
4.6. Ostale elektroničke komponente	28
5. ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA BATERIJE	29
5.1. Određivanje energetske potrebe	29
5.2. Vrste baterija	33
5.3. Određivanje dometa autobusa	34
5.4. Masa autobusa s električnim pogonom	34
6. PRORAČUN PERFORMANSI ELEKTRIČNOG AUTOBUSA.....	36
6.1. Mogućnost svladavanja uspona	37
6.2. Ubrzanje	38
7. OČEKIVANA UŠTEDA U EKSPLOATACIJI.....	40
8. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43
PRILOZI.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1.	Koncept električnog autobusa (lijevo), paralelnog hibridnog (sredina) i serijskog hibridnog (desno) [1].....	1
Slika 2.	BYD K9 [2]	4
Slika 3.	Pogonski sustav autobusa BYD K9 [2]	5
Slika 4.	Solaris Urbino 12 Electric [3]	6
Slika 5.	Solaris Urbino 12 Electric - Razmještaj komponenti [4]	6
Slika 6.	Volvo 7900 Electric [5]	7
Slika 7.	ZF AVE 130 [6]	9
Slika 8.	ZAwheel [7]	9
Slika 9.	Trajanje punjenja u ovisnosti o snazi punjača (lijevo) i punjenje preko utičnice (desno) [8]	10
Slika 10.	Oportunitetno punjenje putem pantografa (lijevo) i elektromagnetskom indukcijom (desno) [8]	11
Slika 11.	Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus [9].....	13
Slika 12.	Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za gradski ispitni vozni ciklus okruga Orange [9].....	14
Slika 13.	Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za TNO ispitni vozni ciklus [9]	15
Slika 14.	Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za ETC ispitni vozni ciklus [9]	16
Slika 15.	NEDC ispitni vozni ciklus [9]	17
Slika 16.	WLTP ispitni vozni ciklus klase 1 [10].....	19
Slika 17.	MAN NL 313 (A21, Lion's City) [11]	20
Slika 18.	Skica otpora vožnje	21
Slika 19.	UQM PowerPhase HD 220 [13].....	24
Slika 20.	Momentna karakteristika elektromotora [13].....	25
Slika 21.	Vučni dijagram s ucrtanom površinom A_{I-2}	27
Slika 22.	Pilasti dijagram mjenjača	27
Slika 23.	Shema električnog autobusa	28
Slika 24.	Usporedba profila ubrzanja proučavanih ispitnih voznih ciklusa	29
Slika 25.	Primjer tablice za proračun energetske potrebe	30
Slika 26.	Dijagram profila brzine za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange.....	30

Slika 27.	Dijagram profila ubrzanja za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange.....	31
Slika 28.	Profil potrebne vučne sile na kotačima za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange	31
Slika 29.	Profil potrebne snage na kotačima za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange	32
Slika 30.	Kumulativ energije za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange	32
Slika 31.	Usporedba gustoća energije za različite vrste baterije [15].....	33
Slika 32.	Vučni dijagram autobusa s električnim pogonom	36
Slika 33.	Vučni dijagram s ucrtanim otporima vožnje	37
Slika 34.	Mogućnost svladavanja uspona.....	38
Slika 35.	Ubrzanje u ovisnosti o brzini i stupnju prijenosa	38
Slika 36.	Ovisnost brzine vožnje o proteklom vremenu.....	39

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Usporedba karakteristika električnih autobusa	8
Tablica 2.	<i>Art.Kinema</i> parametri [9]	12
Tablica 3.	<i>Art.Kinema</i> parametri za Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus [9]	13
Tablica 4.	<i>Art.Kinema</i> parametri za gradski ispitni vozni ciklus okruga Orange [9]	14
Tablica 5.	<i>Art.Kinema</i> parametri za TNO ispitni vozni ciklus [9].....	15
Tablica 6.	<i>Art.Kinema</i> parametri za prvi dio ETC ispitnog voznog ciklusa [9]	16
Tablica 7.	<i>Art.Kinema</i> parametri za gradski dio NEDC ispitnog voznog ciklusa [9].....	18
Tablica 8.	<i>Art.Kinema</i> parametri za dio WLTP ciklusa s niskim brzinama vožnje [10]	19
Tablica 9.	Parametri autobusa MAN NL 313 (A21, Lion's City)	21
Tablica 10.	Karakteristike elektromotora [13].....	24
Tablica 11.	Usporedba potrošnje energije.....	33
Tablica 12.	Masa autobusa s električnim pogonom.....	35
Tablica 13.	Najveći mogući uspon u ovisnosti o popunjenosti autobusa	37
Tablica 14.	Usporedba ubrzanja u ovisnosti o popunjenosti autobusa	39
Tablica 15.	Usporedba cijene i potrošnje energenta te cijene održavanja za električni autobus i autobus s Diesellovim motorom	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$m_{v,0}$	kg	Masa praznog vozila
m_t	kg	Nosivost
$m_{v,max}$	kg	Najveća dopuštena masa vozila
m_v	kg	Masa vozila s teretom
B	m	Širina vozila
H	m	Visina vozila
A	m ²	Čeona površina vozila
c_w	-	Faktor otpora zraka
r_{din}	m	Dinamički polumjer kotača
i_{or}	-	Prijenosni omjer diferencijala
F_v	N	Vučna sila
F_z	N	Sila otpora zraka
F_k	N	Sila otpora kotrljanja
F_u	N	Sila otpora uspona
F_a	N	Sila otpora ubrzanja
G_V	N	Težina vozila
ρ_z	kg/m ³	Gustoća zraka
α	°	Kut uspona podloge
a	m/s ²	Translatorno ubrzanje vozila
P_{kot}	kW	Snaga na kotačima
M_p	Nm	Pogonski moment na kotačima
P_{EM}	kW	Snaga elektromotora
η_m	-	Mehanički stupanj djelovanja
s	%	Uspon u postotcima
$M_{EM,max}$	Nm	Najveći moment elektromotora
i_m	-	Prijenosni omjer reduktora
i_{uk}	-	Ukupni prijenosni omjer transmisije
$i_{m,1}$	-	Prijenosni omjer prvog stupnja mjenjača
$i_{m,2}$	-	Prijenosni omjer drugog stupnja mjenjača
v_{max}	km/h	Najveća brzina vozila
$n_{EM,max}$	min ⁻¹	Najveća brzina vrtnje elektromotora

SAŽETAK

U ovom radu analizirana je elektrifikacija autobusa koji bi se koristio u javnom gradskom prijevozu u Zagrebu. Na početku je dan pregled primjera električnih gradskih autobusa u Europi te pregled ispitnih voznih ciklusa pogodnih za gradske autobuse. Zatim su određene karakteristike elektromotora i dvostupanjskog mjenjača na temelju zahtijevanih performansi autobusa. Karakteristike baterije određene su prema proračunatim energetske potrebama za ispitni vozni ciklus okruga Orange. Na kraju je napravljen proračun performansi autobusa s novim električnim pogonom. Također, napravljena je i analiza uštede na troškovima eksploatacije električnog autobusa u odnosu na konvencionalni autobus s Diesellovim motorom.

Svi proračuni su napravljeni u programu *Microsoft Office Excel*.

Ključne riječi: elektrifikacija, električni autobus, konvencionalni autobus, javni gradski prijevoz, ispitni vozni ciklusi, energetske potrebe, performanse

SUMMARY

This thesis analyzes electrification of a bus to be used in public transport in Zagreb. To begin with, an overview of examples of city buses in Europe and review of driving cycles suitable for buses used in public transport are given. Subsequently, characteristics of electric motor and 2-speed transmission are determined based on the required performance of a bus. Characteristics of the battery are determined according to the calculated energy requirements for Orange County Bus Cycle. Finally, performance of a bus with new electric drive is calculated. Also, an analysis of savings on operating costs of electric bus in relation to the conventional bus with a Diesel engine is made.

All calculations were made using *Microsoft Office Excel*.

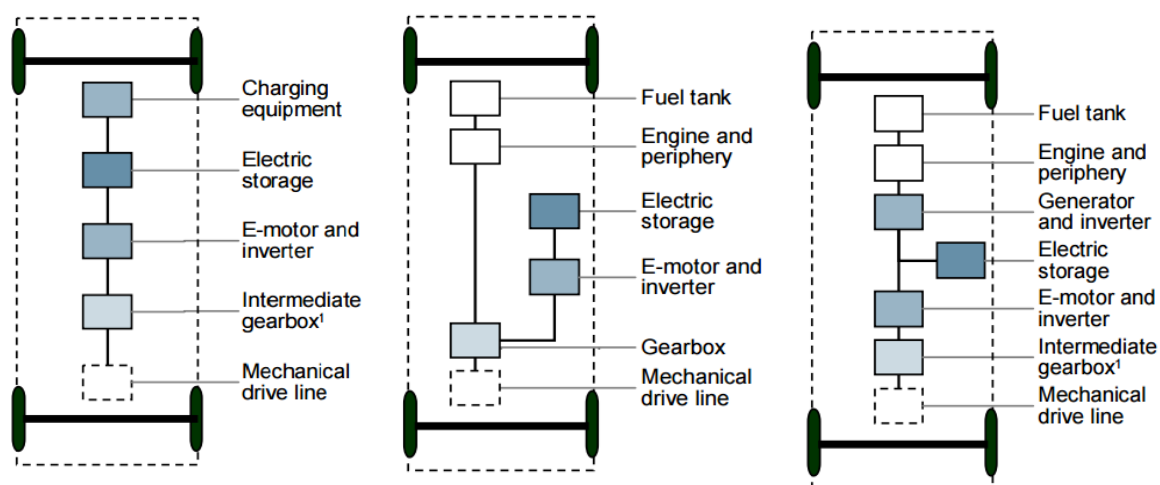
Keywords: electrification, electric bus, conventional bus, public transport, driving cycles, energy requirements, performance

1. UVOD

Proizvođači vozila se posljednjih godina suočavaju sa sve strožim emisijskim normama i zahtjevima za što manjom potrošnjom goriva zbog zabrinutosti za okoliš i ograničene rezerve fosilnih goriva. Stroge zahtjeve je sve teže zadovoljiti s motorima s unutarnjim izgaranjem te se javlja povećano zanimanje za razvojem alternativnih pogonskih sustava.

Autobusi, kao oblik gradskog prijevoza, pružaju mogućnost za značajno smanjenje problema uzrokovanih kako emisijom štetnih tvari, tako i prometom u gradskim sredinama uporabom inovativnih tehnika i tehnologija u razvoju pogonskih sustava autobusa.

U posljednje vrijeme se elektrifikacija pogonskih sustava smatra kao moguće rješenje problema te donosi mnoge prednosti kao što su: smanjenje emisija štetnih tvari, povećanje efikasnosti vozila, poboljšanje performansi, smanjenje potrošnje goriva te niži troškovi održavanja. Pod električnim pogonskim sustavom smatra se da je u sustavu barem jedna od komponenti električni motor. Poznate električne pogonske tehnologije su: hibridna i potpuno električna. Hibridna tehnologija je prvi korak elektrifikacije, a s obzirom da koristi motor s unutarnjim izgaranjem i električni motor, vrlo je kompliciran sustav te ne donosi tako značajna poboljšanja kao potpuno električni pogonski sustavi. Potpuno električni pogonski sustavi uz električni motor moraju imati izvor električne energije što može biti baterija ili gorivne ćelije. Konceptije hibridnog i potpuno električnog autobusa prikazane su na slici 1.



Slika 1. Koncept električnog autobusa (lijevo), paralelnog hibridnog (sredina) i serijskog hibridnog (desno) [1]

U slučaju baterijskog električnog autobusa postoje dvije mogućnosti što se tiče kapaciteta baterija i sustava punjenja. Prva je korištenje baterije velikog kapaciteta (200-300 kWh) koje omogućuju skladištenje dovoljno električne energije da autobus može prometovati 8-12 sati bez nadopunjavanja. Baterije se u ovom slučaju nadopunjavaju u spremištu spajanjem na električnu mrežu preko utičnice (engl. *Plug-In*). Druga opcija uključuje bateriju manjeg kapaciteta (50-100 kWh), te nadopunjavanje na okretištima na početku/završetku rute. Punjenje se obavlja putem pantografa ili induktivnim punjenjem u kratkom vremenu (obično 5-10 minuta). Taj način punjenja naziva se oportunitetno punjenje (engl. *opportunity charging*). Druga opcija ima prednosti, kao što su znatno manja masa baterije i mogućnost prometovanja bez prestanka, ali i veliki nedostatak, a to je vrlo skupa infrastruktura sustava punjenja.

Uvidjevši mogućnosti smanjenja emisija štetnih tvari i razine buke u gradovima kroz elektrifikaciju autobusa namijenjenih javnom gradskom prijevozu, Europska unija je financirala projekt pod nazivom ZeEUS (engl. *Zero Emission Urban Bus System*). Glavna zadaća ovog projekta jest potaknuti testiranje električnih autobusa s različitim tehnologijama sustava pogona i sustava punjenja u europskim gradovima. Cilj je stvoriti održivi transportni sustav korištenjem alternativnih pogonskih sustava s posebnim naglaskom na potpuno električne baterijske autobuse. U Europi se u pedesetak gradova već počelo s eksploatacijom električnih autobusa, a vodeći u tome je London gdje je u upotrebi već osamdesetak potpuno električnih autobusa i čak 1500 hibridnih autobusa.

U ovom radu analizira se elektrifikacija autobusa koji bi se koristio u gradskom prijevozu u Zagrebu. Radi se o autobusu MAN NL 313 (A21, Lion's City) u koji je potrebno ugraditi električni pogonski sustav s baterijama dimenzioniran sukladno energetske potrebe koje su dobivene analizom standardnih ispitnih voznih ciklusa. Također, izvršen je proračun performansi navedenog autobusa s novim pogonskim sustavom (ubrzanje i svladavanje uspona).

U **drugom** poglavlju su prikazani primjeri električnih autobusa namijenjenih javnom gradskom prijevozu, pri čemu je naglasak stavljen na Europu. Prikazani su i gotovi električni pogonski mostovi te vrste punjača.

U **trećem** poglavlju je napravljen pregled ispitnih voznih ciklusa pogodnih za gradske autobuse.

U **četvrtom** poglavlju napravljena je analiza otpora vožnje koji djeluju na vozilo. Zatim su na temelju zahtijevanih performansi (najveća brzina vozila, mogućnost svladavanja uspona) određene karakteristike elektromotora i prijenosa.

U **petom** poglavlju je napravljena analiza energetske potreba gradskog autobusa s električnim pogonom za standardne ispitne vozne cikluse (gradski dio NEDC i WLTP ciklusa) i ispitne vozne cikluse za autobuse (ispitni vozni ciklus okruga Orange). Na temelju energetske potreba određene su karakteristike baterije.

U **šestom** poglavlju izvršen je proračun performansi gradskog autobusa s novim električnim pogonom. Pritom se misli na sljedeće performanse: mogućnost svladavanja uspona i ubrzanje.

U **sedmom** poglavlju izvršena je analiza očekivane uštede u eksploataciji električnog autobusa u odnosu na autobus s Diesellovim motorom.

2. PRIMJERI BATERIJSKIH ELEKTRIČNIH AUTOBUSA U EUROPI

2.1. BYD K9

BYD K9 (slika 2) je baterijski električni autobus kojeg proizvodi kineski proizvođač BYD Auto. Prvi primjerak je proizveden 2010. godine, a 2015. godine tvrtka BYD je prodala rekordnih 6000 primjeraka ovog autobusa diljem svijeta. Cijena se kreće u rasponu od 260.000 € do 400.000 €, ovisno o izvedbi i opremljenosti.

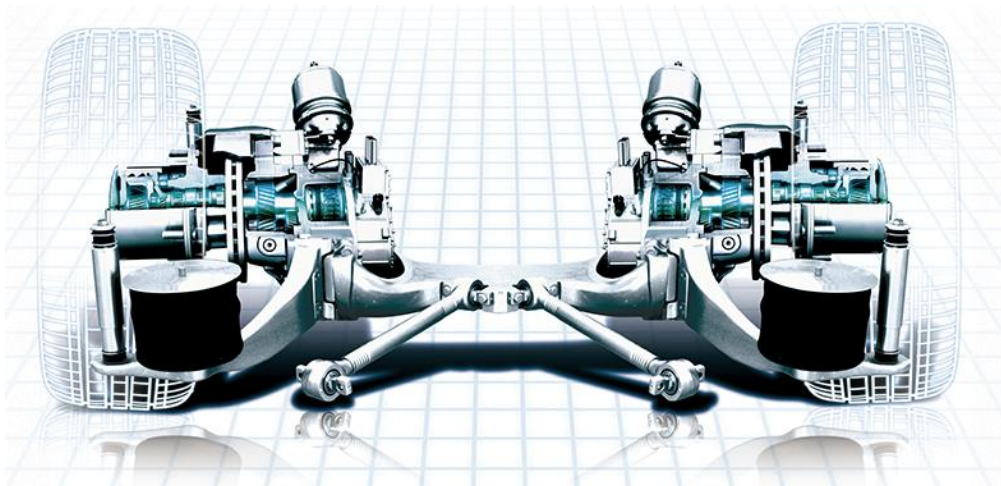


Slika 2. BYD K9 [2]

Za pohranu električne energije koristi litij-željezo-fosfatne (LiFePO_4) baterije vlastite proizvodnje. Ovaj tip baterija je neotrovan i moguće ih je reciklirati, što ih čini vrlo ekološki prihvatljivima. Kapacitet baterija od 324 kWh u gradskom prometu omogućava domet od 250 kilometara s jednim punjenjem. Baterije su podijeljene u 3 paketa, 2 se nalaze sa svake strane iznad prednjih kotača, a treći na krovu. Punjenje baterija do punog kapaciteta traje otprilike 6 sati, ali postoji i opcija brzog punjenja koja skraćuje to vrijeme na 3 sata.

Pogonski sustav (slika 3) je integriran u glavčine zadnjih kotača i sastoji se od elektromotora i reduktora. Par sinkronih elektromotora daje snagu za pokretanje autobusa, svaki snage 75 kW, što daje kombiniranu snagu od 150 kW. Brzina vrtnje se kreće u rasponu od 0 do 7500 min^{-1} . Najveći moment iznosi 700 Nm ($350 \text{ Nm} \times 2$). Prijenosni omjer reduktora je 17,7. U nekim izvedbama su dostupni i motori snage 150 kW (kombinirano 300 kW). Također, pogonski sustav radom u generatorskom režimu omogućuje nadopunjavanje baterija regenerativnim kočenjem.

Ovakav pogonski sustav omogućuje najveću brzinu od 70 km/h, ubrzanje od 0-50 km/h za 20 s, te mogućnost svladavanja uspona od 15 %. Ove performanse u potpunosti zadovoljavaju potrebe u javnom gradskom prijevozu.



Slika 3. Pogonski sustav autobusa BYD K9 [2]

Zbog mase baterija i volumena koji one zauzimaju u putničkom prostoru, kapacitet ovog autobusa je manji u odnosu na autobus istih dimenzija pokretan motorom s unutarnjim izgaranjem. Posjeduje 25-32 sjedeća mjesta, ovisno o izvedbi, dok broj stajaćih mjesta nije dan u specifikacijama. Usporedbe radi, MAN autobus koji se razmatra u ovom radu ima 45 sjedećih mjesta.

Veliki broj europskih gradova, kao što su Helsinki, London, Varšava, vrši testiranja s BYD K9 autobusom u javnom gradskom prijevozu. Predvodi London gdje je u eksploataciji 58 potpuno električnih autobusa tvrtke BYD.

2.2. Solaris Urbino 12 Electric

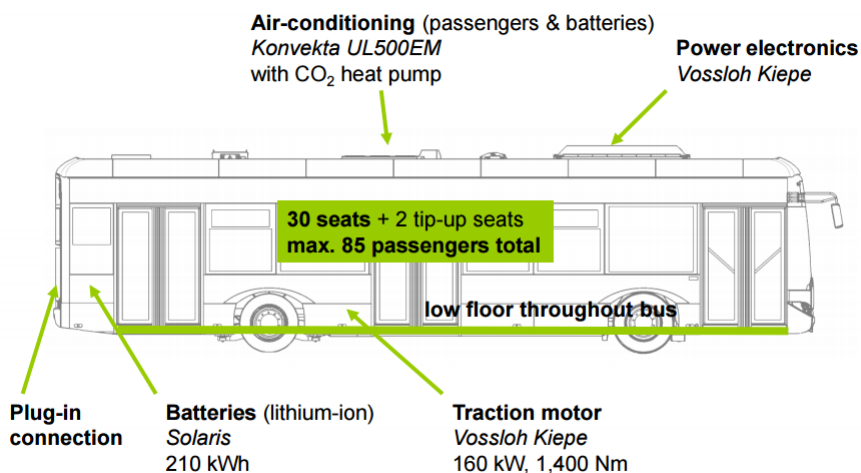
Solaris Urbino 12 je serija autobusa, koju od 1999. godine, proizvodi poljska kompanija Solaris Bus & Coach. Od 2010. godine proizvodi se hibridna verzija, a od 2013. i potpuno električna verzija ovog autobusa pod nazivom Solaris Urbino 12 Electric. Električna verzija je dobila nagradu "Autobus godine 2017.". Natjecanje "Autobus godine" (engl. *The Bus of The Year*) se održava od 1989. godine i ovo je prvi put da je nagradu dobio potpuno električni autobus.

Za pogon su dostupne 2 vrste pogonskog sustava. Prva opcija uključuje jedan asinkroni elektromotor snage 160 kW te najvećeg okretnog momenta od 1400 Nm. Motor je centralno smješten i omogućuje korištenje standardnih ZF pogonskih mostova. Razmještaj komponenti se može vidjeti na slici 5. Druga opcija, dostupna u novim inačicama, je slična kao kod BYD autobusa, a koristi ZF-ov pogonski most s elektromotorima i reduktorima integriranim u glavčine kotača. U tom slučaju svaki elektromotor razvija snagu od 60 kW. Oba pogonska sustava omogućavaju regenerativno kočenje.



Slika 4. Solaris Urbino 12 Electric [3]

Autobus je opremljen litij-ionskim (Li-ion) baterijama vlastite proizvodnje, a moguće je odabrati različite kapacitete, sve do 240 kWh. Punjenje baterija se može vršiti klasičnim spajanjem na električnu mrežu preko utičnice ili oportunitetnim punjenjem.



Slika 5. Solaris Urbino 12 Electric - Razmještaj komponenti [4]

2.3. Volvo 7900 Electric

Volvo je 2011. godine predstavio novu seriju gradskih autobusa, seriju 7900. Uz izvedbe s motorima s unutarnjim izgaranjem, od početka proizvodnje je dostupna i hibridna izvedba koja je ujedno i najprodavanija. Potpuno električna izvedba ove serije autobusa predstavljena je 2015. godine (slika 6).



Slika 6. Volvo 7900 Electric [5]

Dostupna je isključivo opcija oportunitetnog punjenja, čime se smanjuje potrebni kapacitet baterija, a time i masa autobusa. Punjenje se obavlja putem pantografa na krajnjim stanicama i traje 3-6 minuta te omogućava domet od 10 do 20 kilometara, što je sasvim dovoljno za većinu ruta u gradskom javnom prijevozu. Korištenjem ovakvog sustava omogućeno je da se autobus praktički može konstantno držati u prometu.

Baterije su litij-ionske, podijeljene u 4 paketa kapaciteta 19 kWh, što daje ukupni kapacitet od 76 kWh. Također, punjenje baterija se vrši i putem regenerativnog kočenja.

Za pogon je zadužen elektromotor snage 160 kW i najvećeg momenta od 400 Nm. Prijenos se vrši preko dvostupanjskog automatskog mjenjača razvijenog od strane Volva, te se snaga dalje odvodi na ZF-ov pogonski most.

S obzirom na znatno manju bateriju u odnosu na druga dva razmatrana autobusa, putnički kapacitet je znatno veći te je gotovo jednak autobusima pokretanim motorima s unutarnjim izgaranjem. Drugim riječima, dostupno je 35 sjedećih mjesta, a maksimalni broj putnika iznosi 105.

U tablici 1 dana je usporedba važnijih karakteristika gore navedenih autobusa.

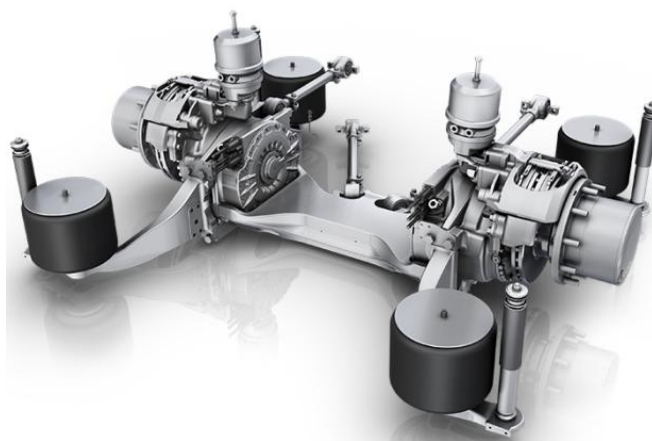
Tablica 1. Usporedba karakteristika električnih autobusa

	BYD K9	Solaris Urbino 12 Electric	Volvo 7900 Electric
Tip elektromotora	Sinkroni motor izmjenične struje (2x)	Asinkroni motor izmjenične struje	Sinkroni motor izmjenične struje
Snaga [kW]	150 (75x2) ili 300 (150x2)	160	160
Najveći moment [Nm]	700 (350x2) ili 3000 (1500x2)	1400	400
Prijenos	Reduktor u glavčini (prijenosni omjer 17,7)	Diferencijal u sklopu pogonskog mosta (ZF AV 132)	Volvo 2-stupanjski automatski mjenjač + diferencijal (ZF AV 132)
Tip baterija	LiFePO ₄	Li-Ion	Li-Ion
Kapacitet [kWh]	324	max. 240	76
Način punjenja	Punjenje preko utičnice (engl. <i>Plug-In</i>)	Punjenje preko utičnice (engl. <i>Plug-In</i>) + oportunitetno punjenje	Oportunitetno punjenje
Vrijeme punjenja	6 sati (brzo punjenje 3 sata)	-	3-6 minuta
Domet [km]	250	-	10 do 20
Putnički kapacitet	-	max. 85	max. 105

2.4. Električni pogonski mostovi

Tvrtke ZF i Ziehl-Abegg u ponudi imaju gotove pogonske mostove s integriranim električnim pogonskim sustavima, koje je moguće ugraditi na novi autobus, a moguće je i ugraditi na već postojeći autobus umjesto postojeće osovine i uz eliminaciju motora s unutarnjim izgaranjem.

Tvrtka ZF u ponudi ima električni pogonski most pod nazivom *ZF AVE 130* (slika 7). Koristi 2 asinkrona elektromotora s reduktorima integrirana u glavčini. Snaga pojedinog motora iznosi 125 kW, a najveći moment na kotaču 11000 Nm. Prijenosni omjer reduktora je 22,66.



Slika 7. ZF AVE 130 [6]

Tvrtka Ziehl-Abegg ima u ponudi vrlo slično rješenje, pod nazivom *ZAwheel* (slika 8). Za razliku od *ZF AVE 130*, ovaj pogonski sustav nema reduktora. Koristi 2 sinkrona elektromotora, svaki snage 117 kW i najvećeg momenta od 3200 Nm.



Slika 8. ZAwheel [7]

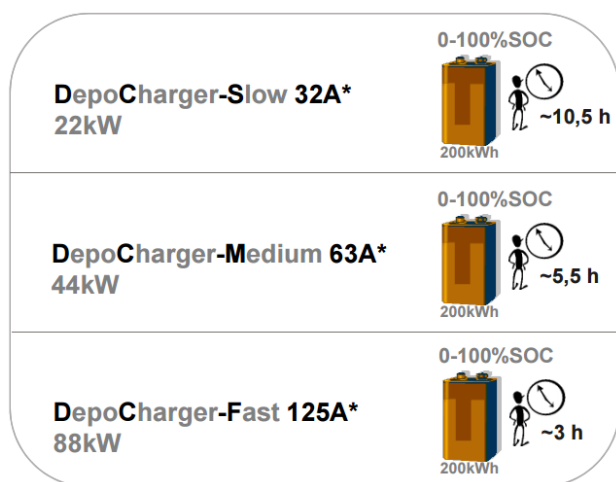
2.5. Načini punjenja baterija

Za baterijske električne autobuse dostupne su dvije opcije nadopunjavanja baterije:

- punjenje preko utičnice (engl. *Plug-In*) u spremištima tijekom noći (engl. *overnight charging*)
- punjenje na početnim/krajnjim stanicama, tzv. oportunitetno punjenje (engl. *Opportunity charging*).

2.5.1. Punjenje preko utičnice (engl. *Plug-In*)

U slučaju ove tehnologije punjenja, nadopunjavanje baterije se odvija u spremištima u vremenu kada autobus nije u prometu (najčešće preko noći) spajanjem na električnu mrežu preko utičnice i odgovarajućeg punjača (slika 9). Brzina punjenja baterije ovisi o snazi punjača, što je prikazano na slici 9. S obzirom da je u ovom slučaju znatno više vremena dostupno za punjenje, punjači su manjih snaga te samim time i jeftiniji. Najveći nedostatak je što je vrijeme koje autobus može provesti u prometu ograničeno kapacitetom baterije, a sama baterija mora biti većeg kapaciteta što smanjuje putnički kapacitet autobusa.



Slika 9. Trajanje punjenja u ovisnosti o snazi punjača (lijevo) i punjenje preko utičnice (desno) [8]

2.5.2. Oportunitetno punjenje (engl. *Opportunity charging*)

U slučaju oportunitetnog punjenja, baterija se mora napuniti u vrlo kratkom roku (5-10 minuta) do kapaciteta koji je dovoljan da autobus odveze cijelu rutu, pa samim time snaga punjača mora biti znatno veća (200-400 kW). Punjenje se vrši na krajnjim stanicama putem pantografa ili elektromagnetskom indukcijom (slika 10). Oba sustava imaju automatizirano spajanje na punjač koje se aktivira čim autobus stane na stanici. Pantograf se automatski

podigne, ili u slučaju elektromagnetske indukcije, ploča sa zavojnicama se automatski spusti i punjenje započinje. Potrebna infrastruktura za ovu tehnologiju je znatno skuplja, pogotovo u slučaju punjenja elektromagnetskom indukcijom, no velika prednost je to što se autobus teoretski može držati konstantno u prometu. Infrastruktura bi mogla biti jeftinija u gradovima gdje već postoji infrastruktura za električni tramvaj te ako se preklapaju okretišta autobusa i električnog tramvaja, kao što je to slučaj s nekim okretištima u Zagrebu (Čnomerec, Savski most, Mihaljevac, Borongaj,...).



Slika 10. Oportunitetno punjenje putem pantografa (lijevo) i elektromagnetskom indukcijom (desno) [8]

3. PREGLED ISPITNIH VOZNIH CIKLUSA POGODNIH ZA GRADSKA AUTOBUSE

Ispitni vozni ciklus (engl. *driving cycle*) je strogo određen raspored operacija koji omogućuje da se testiranje vozila može bilo kada ponoviti u istim, zadanim uvjetima. Primarno služe za određivanje emisija štetnih tvari vozila i potrošnje goriva, a mogu služiti i za određivanje potrošnje električne energije u slučaju električnih vozila. Ispitni ciklusi obično definiraju brzinu vozila i izmjenu stupnja prijenosa u ovisnosti o vremenu.

Za potrebe ovog rada proučavati će se ispitni ciklusi namijenjeni autobusima za javni gradski prijevoz, a to su: Braunschweig gradski ispitni ciklus, ispitni ciklus za autobuse okruga Orange (engl. *Orange County Bus Cycle*), TNO ispitni ciklus za autobuse, ETC ispitni vozni ciklus. Također su prikazani i standardni ispitni ciklusi, NEDC i WLTP.

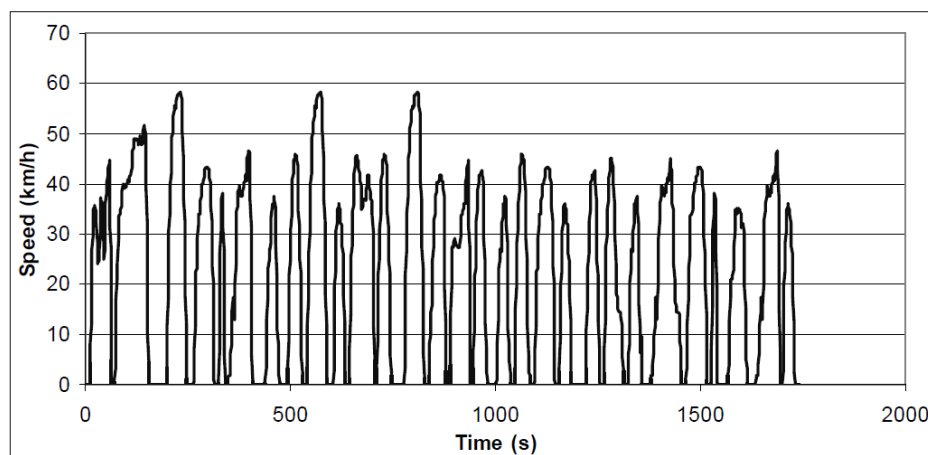
Švicarska organizacija INFRAS, koja godinama radi istraživanja na području održivog razvoja, razvila je aplikaciju pod nazivom *Art.Kinema*. Aplikacija služi za analizu ispitnih ciklusa kroz više od 30 parametara te će se i ispitni ciklusi razmatrati u ovom radu analizirati kroz odabrane parametre bitne za ovaj rad. Ti parametri su dani u tablici 2.

Tablica 2. *Art.Kinema* parametri [9]

Grupa	Parametar	Mjerna jedinica
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	s
	Vrijeme vožnje	s
	Vrijeme utrošeno na ubrzavanje	s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	s
	Vrijeme stajanja	s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina ukupnog puta	km/h
	Prosječna brzina vožnje	km/h
	Najveća brzina	km/h
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	m/s^2
	Prosječno negativno ubrzanje	m/s^2
	Broj ubrzanja	
	Broj ubrzanja po kilometru	/km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	
	Broj stajanja po kilometru	/km
	Prosječno vrijeme stajanja	s
	Prosječna udaljenost između stajanja	m

3.1. Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus

Ovaj ispitni vozni ciklus je razvijen na Tehničkom sveučilištu u Braunschweigu kako bi simulirao vožnju gradskog autobusa s čestim stajanjima. Iako je razvijen još 1970-ih godina, još uvijek se vrlo često primjenjuje u ispitivanjima autobusa namijenjenih javnom gradskom prijevozu. Brzina vozila u ovisnosti o proteklom vremenu je prikazana dijagramom na slici 11, a pregled odabranih *Art.Kinema* parametara dan je u tablici 3.



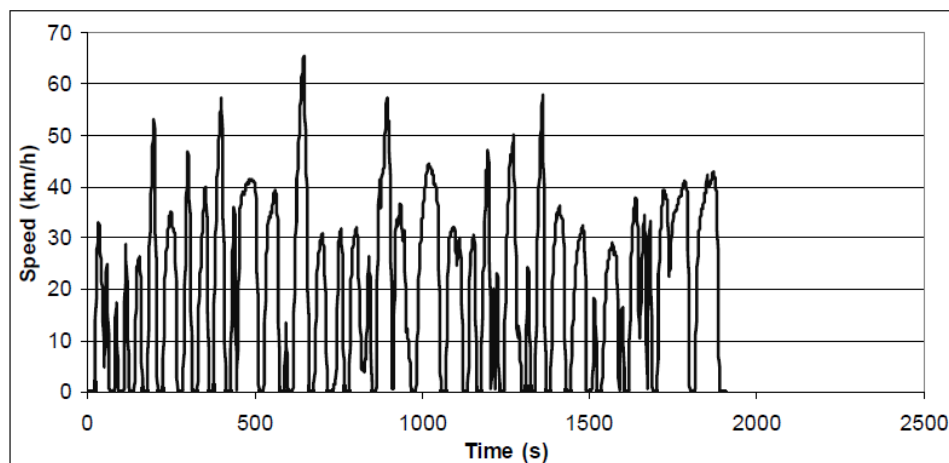
Slika 11. Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus [9]

Tablica 3. *Art.Kinema* parametri za Braunschweig gradski ispitni vozni ciklus [9]

Grupa	Parametar	
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	10900,32 m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	1740 s
	Vrijeme vožnje	1452 s
	Vrijeme utrošeno na ubrzanje	712 s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	495 s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	369 s
	Vrijeme stajanja	288 s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina puta	22,6 km/h
	Prosječna brzina vožnje	27,03 km/h
	Najveća brzina	58,21 km/h
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	0,424 m/s ²
	Prosječno negativno ubrzanje	-0,595 m/s ²
	Broj ubrzanja	52
	Broj ubrzanja po kilometru	4,771 /km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	26
	Broj stajanja po kilometru	2,39 /km
	Prosječno vrijeme stajanja	11,08 s
	Prosječna udaljenost između stajanja	419,24 m

3.2. Ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange

Ispitni vozni ciklus okruga Orange (engl. *Orange County Bus Cycle*) razvijen je na Sveučilištu Zapadne Virginije, a baziran je na realnim rutama autobusa koji prometuju okrugom Orange u Kaliforniji. Ovaj ispitni vozni ciklus je vrlo sličan prethodnom, što se može vidjeti usporedbom dijagrama promjene brzine u ovisnosti o vremenu i tablica s *Art.Kinema* parametrima.



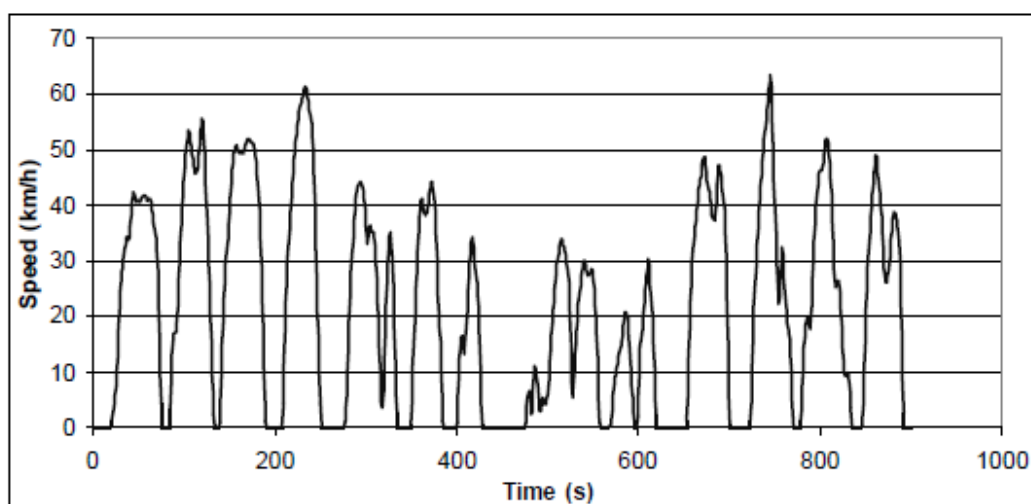
Slika 12. Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za gradski ispitni vozni ciklus okruga Orange [9]

Tablica 4. *Art.Kinema* parametri za gradski ispitni vozni ciklus okruga Orange [9]

Grupa	Parametar	
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	10529,75 m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	1909 s
	Vrijeme vožnje	1592 s
	Vrijeme utrošeno na ubrzavanje	794 s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	546 s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	404 s
	Vrijeme stajanja	317 s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina puta	19,9 km/h
	Prosječna brzina vožnje	23,81 km/h
	Najveća brzina	64,79 km/h
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	0,413 m/s ²
	Prosječno negativno ubrzanje	-0,584 m/s ²
	Broj ubrzanja	62
	Broj ubrzanja po kilometru	5,888 /km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	32
	Broj stajanja po kilometru	3,04 /km
	Prosječno vrijeme stajanja	9,91 s
	Prosječna udaljenost između stajanja	329,05 m

3.3. TNO ispitni vozni ciklus za autobuse

TNO ispitni vozni ciklus, poznat i kao nizozemski gradski ispitni vozni ciklus (engl. *Dutch Urban Bus Cycle*), razvijen je od strane TNO-a, nizozemske organizacije za primijenjena znanstvena istraživanja. Ovaj ispitni vozni ciklus temeljen je na realnim uvjetima vožnje gradskog autobusa u javnom prijevozu.



Slika 13. Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za TNO ispitni vozni ciklus [9]

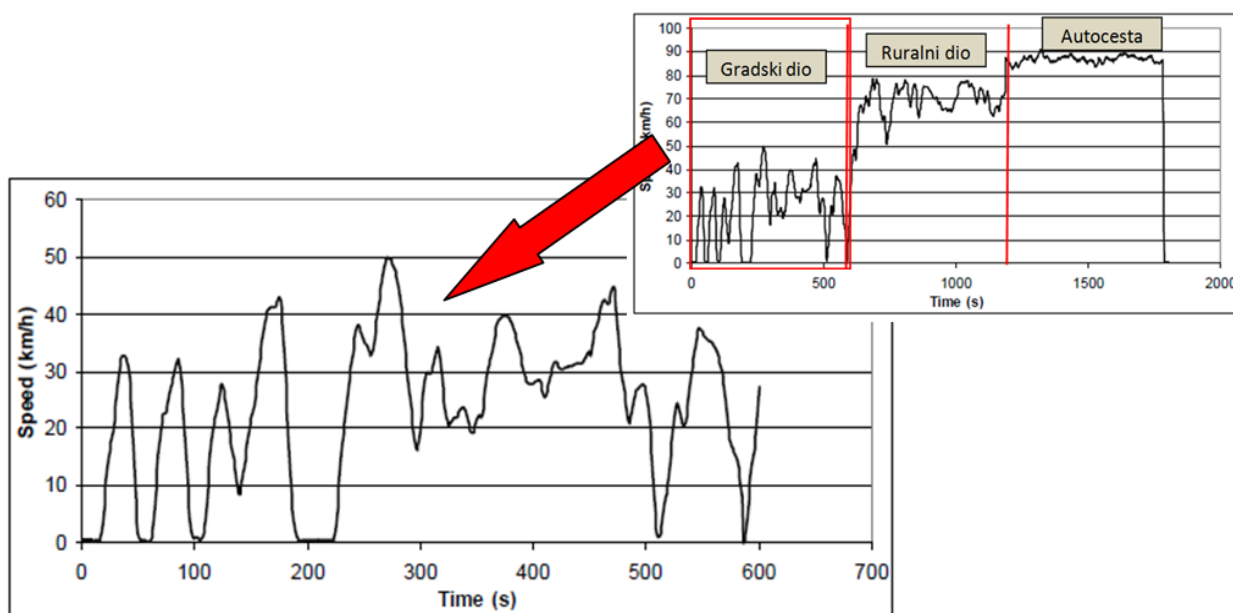
Tablica 5. Art. Kinema parametri za TNO ispitni vozni ciklus [9]

Grupa	Parametar	
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	5247,94 m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	898 s
	Vrijeme vožnje	706 s
	Vrijeme utrošeno na ubrzavanje	343 s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	276 s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	217 s
	Vrijeme stajanja	192 s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina puta	21,0 km/h
	Prosječna brzina vožnje	26,76 km/h
	Najveća brzina	61,81 km/h
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	0,516 m/s ²
	Prosječno negativno ubrzanje	-0,633 m/s ²
	Broj ubrzanja	33
	Broj ubrzanja po kilometru	6,288 /km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	14
	Broj stajanja po kilometru	2,67 /km
	Prosječno vrijeme stajanja	13,71 s
	Prosječna udaljenost između stajanja	374,85 m

3.4. ETC ispitni vozni ciklus

ETC (engl. *European Transient Cycle*) ispitni vozni ciklus uveden je 2000. godine te je namijenjen za testiranje emisija Diesellovih motora za teške uvjete rada (engl. *Heavy-duty diesel engine*).

Ovaj ispitni vozni ciklus se sastoji od 3 dijela, svaki dio traje 600 sekundi. Prvi dio predstavlja vožnju u gradu s najvećom brzinom od 50 km/h i čestim ubrzavanjima i usporavanjima. Drugi dio je vožnja ruralnim cestama bez stajanja uz prosječnu brzinu od 72 km/h. Treći dio je vožnja autocestom uz prosječnu brzinu od 88 km/h. Za ispitivanje gradskih autobusa je zanimljiv samo prvi dio ovog ispitnog voznog ciklusa.



Slika 14. Promjena brzine u ovisnosti o vremenu za ETC ispitni vozni ciklus [9]

Tablica 6. Art.Kinema parametri za prvi dio ETC ispitnog voznog ciklusa [9]

Grupa	Parametar	
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	3874,3 m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	600 s
	Vrijeme vožnje	600 s
	Vrijeme utrošeno na ubrzavanje	245 s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	192 s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	113 s
	Vrijeme stajanja	0 s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina puta	23,3 km/h
	Prosječna brzina vožnje	23,25 km/h
	Najveća brzina	61,81 km/h

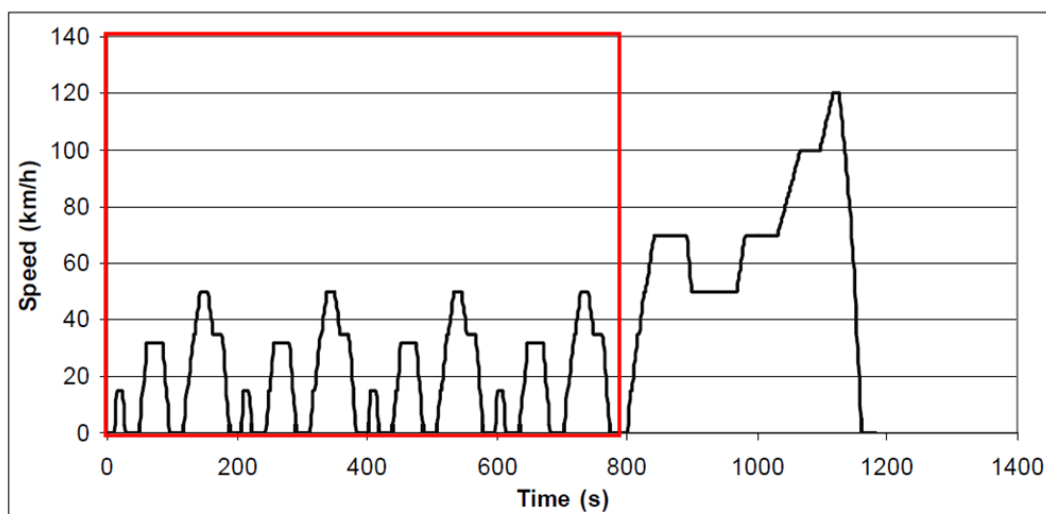
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	0,273 m/s ²
	Prosječno negativno ubrzanje	-0,313 m/s ²
	Broj ubrzanja	86
	Broj ubrzanja po kilometru	22,198 /km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	0
	Broj stajanja po kilometru	0 /km
	Prosječno vrijeme stajanja	-
	Prosječna udaljenost između stajanja	-

3.5. NEDC ispitni vozni ciklus

NEDC (engl. *New European Driving Cycle*) ispitni vozni ciklus je namijenjen ispitivanju emisija štetnih tvari i potrošnje goriva osobnih automobila u Europskoj uniji, ali može se primijeniti i za ispitivanje gradskih autobusa ako se promatra samo gradski dio ovoga ciklusa. Ovaj ispitni vozni ciklus bi trebao predstavljati tipičnu vožnju osobnog automobila u Europi, no daje vrijednosti potrošnje goriva i emisije štetnih tvari koje nije moguće postići u realnim uvjetima. Zbog nedostataka ovog ciklusa razvijen je novi ispitni vozni ciklus, WLTP (engl. *Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedures*) ispitni vozni ciklus koji će zamijeniti NEDC ispitni vozni ciklus.

NEDC ispitni vozni ciklus sastoji se od gradskog dijela ciklusa (engl. *UDC - Urban Driving Cycle*) i izvangradskog dijela (engl. *EUDC - Extra Urban Driving Cycle*). Gradski dio se sastoji od četiri ponavljanja elementarnog ECE-15 ciklusa.

Za potrebe gradskog autobusa promatrati će se samo gradski dio ciklusa koji je uokviren na slici 15.



Slika 15. NEDC ispitni vozni ciklus [9]

Tablica 7. Art.Kinema parametri za gradski dio NEDC ispitnog voznog ciklusa [9]

Grupa	Parametar	
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	3978,4 m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	780 s
	Vrijeme vožnje	600 s
	Vrijeme utrošeno na ubrzavanje	212 s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	192 s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	160 s
	Vrijeme stajanja	180 s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina puta	18,4 km/h
	Prosječna brzina vožnje	23,87 km/h
	Najveća brzina	50,07 km/h
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	0,348 m/s ²
	Prosječno negativno ubrzanje	-0.393 m/s ²
	Broj ubrzanja	12
	Broj ubrzanja po kilometru	3,016 /km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	12
	Broj stajanja po kilometru	4,02 /km
	Prosječno vrijeme stajanja	11,25 s
	Prosječna udaljenost između stajanja	248,65 m

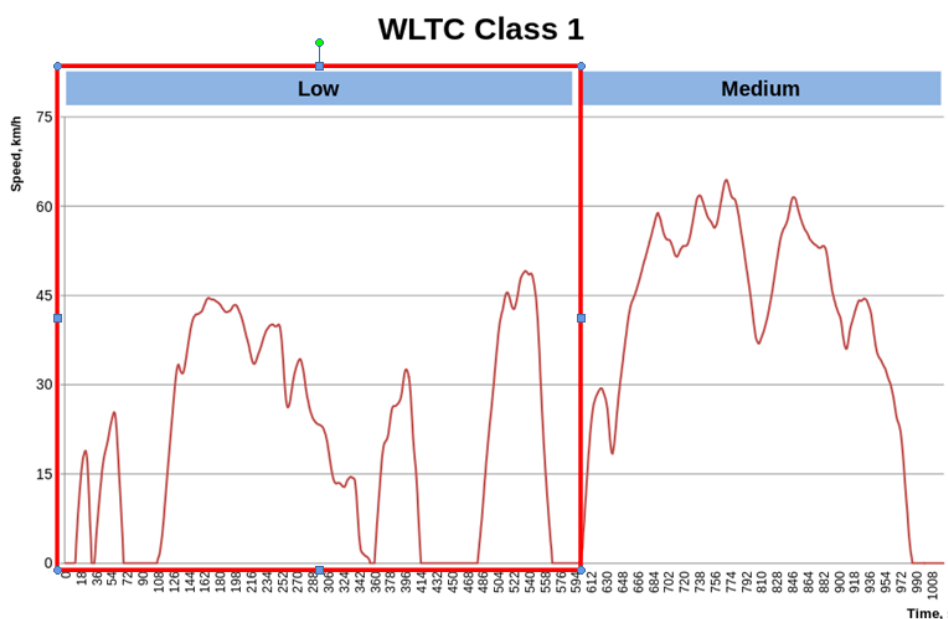
3.6. WLTP ispitni vozni ciklus

WLTP (engl. *The Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*) je ispitni vozni ciklus koji će zamijeniti NEDC ispitni vozni ciklus u ispitivanju emisija štetnih tvari i potrošnje goriva osobnih vozila u Europskoj uniji.

Tri su vrste WLTP ispitnog voznog ciklusa ovisno o tome u koju klasu vozilo spada. Vozila se svrstavaju u tri klase prema omjeru snage i mase vozila:

- Klasa 1 - vozila male snage, omjer snage i mase vozila ≤ 22 kW/t
- Klasa 2 - $22 \text{ kW/t} < \text{omjer snage i mase vozila} \leq 34$ kW/t
- Klasa 3 - vozila velike snage, omjer snage i mase vozila > 34 kW/t

Iako je ovaj ciklus namijenjen isključivo osobnim vozilima, za potrebe ispitivanja gradskog autobusa se može koristiti WLTP ispitni vozni ciklus klase 1 i to samo dio s niskim brzinama vožnje uokviren na slici 16.



Slika 16. WLTP ispitni vozni ciklus klase 1 [10]

Tablica 8. Art.Kinema parametri za dio WLTP ciklusa s niskim brzinama vožnje [10]

Grupa	Parametar	
Vezano za udaljenost	Ukupna udaljenost	3324 m
Vezano za vrijeme	Ukupno vrijeme	589 s
	Vrijeme vožnje	434 s
	Vrijeme utrošeno na ubrzavanje	233 s
	Vrijeme utrošeno na usporavanje	203 s
	Vrijeme utrošeno na kočenje	-
	Vrijeme stajanja	155 s
Vezano za brzinu	Prosječna brzina puta	20,3 km/h
	Prosječna brzina vožnje	27,6 km/h
	Najveća brzina	49,1 km/h
Vezano za ubrzanje	Prosječno pozitivno ubrzanje	0,229 m/s ²
	Prosječno negativno ubrzanje	-0.263 m/s ²
	Broj ubrzanja	7
	Broj ubrzanja po kilometru	2,106 /km
Vezano za stajanje	Broj stajanja	6
	Broj stajanja po kilometru	1,805 /km
	Prosječno vrijeme stajanja	25,8 s
	Prosječna udaljenost između stajanja	-

4. ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA ELEKTROMOTORA

Karakteristike elektromotora određuju se na temelju performansi koje se zahtijevaju od autobusa koji se koristi u javnom gradskom prijevozu. Za određivanje potrebne snage elektromotora analiziraju se otpori vožnje za slučaj najvećeg uspona koji autobus mora moći svladati te za slučaj najveće brzine koju autobus mora moći postići i to za najveću dopuštenu masu autobusa.

4.1. Karakteristike autobusa

U ovom radu proučava se elektrifikacija autobusa MAN NL 313 (A21, Lion's City), koji se koristi u gradskom prijevozu u Zagrebu u službi prijevozničke tvrtke ZET (Zagrebački Električni Tramvaj). Ovaj model autobusa, prikazan na slici 17, u službi je od 2009. godine. Za pogon autobusa se koristi Dieslov motor s unutarnjim izgaranjem oznake D 2066 LOH05. Najveća snaga motora iznosi 235 kW, a najveći moment 1600 Nm. Snaga se prenosi na kotače putem četverobrzinske automatske transmisije i diferencijala u sklopu pogonskog mosta.



Slika 17. MAN NL 313 (A21, Lion's City) [11]

Potrebno je ukloniti motor s unutarnjim izgaranjem i mjenjač, te ugraditi elektromotor koji će snagu na kotače prenositi putem postojećeg diferencijala. Također je potrebno ugraditi i bateriju. Karakteristike elektromotora i baterije se određuju na temelju proračunatih energetske potrebe, zahtijevane najveće brzine i mogućnosti svladavanja najvećeg

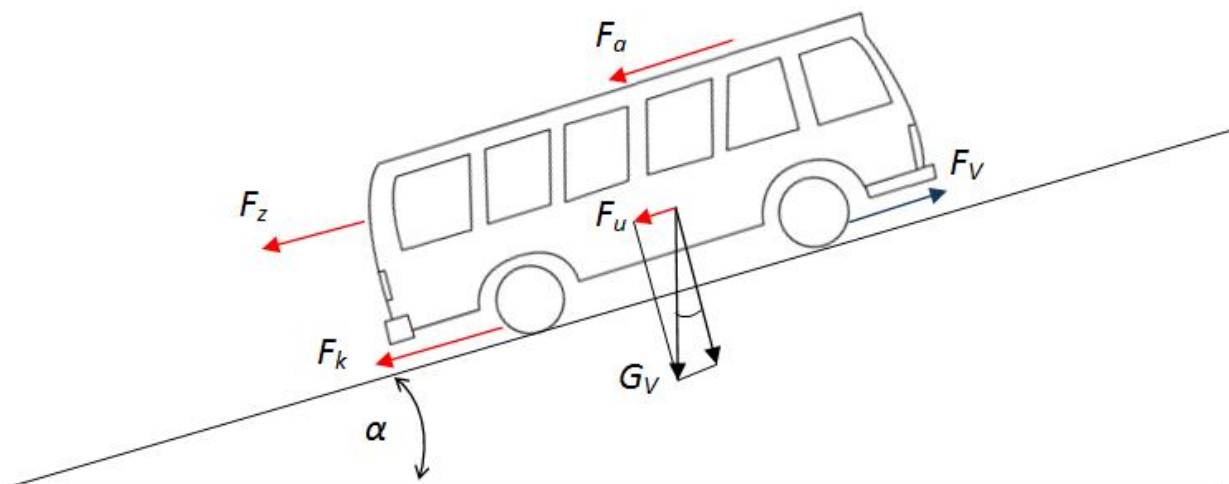
zahtijevanog uspona. Parametri potrebni za proračun energetske potrebe za navedeni autobus su dani u tablici 9.

Tablica 9. Parametri autobusa MAN NL 313 (A21, Lion's City)

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Masa praznog vozila	$m_{v,0}$	12000	kg
Nosivost	m_t	6000	kg
Najveća dopuštena masa vozila	$m_{v,max}$	18000	kg
Širina vozila	B	2,500	m
Visina vozila	H	2,880	m
Čeona površina vozila	A	6,65	m ²
Faktor otpora zraka	c_w	0,45	-
Dimenzija guma	-	275/70 R 22,5	-
Dinamički polumjer kotača	r_{din}	0,465	m
Faktor otpora kotrljanja	f_k	0,008	-
Prijenosni omjer diferencijala	i_{or}	5,74	-

4.2. Otpori vožnje

Vučna sila na kotaču (F_v) mora nadvladati otpore vožnje koji uključuju: silu otpora zraka (F_z), silu otpora kotrljanja (F_k), silu otpora uspona (F_u) i silu otpora ubrzanja (F_a). Skica svih sila otpora na vozilo prikazana je na slici 18. U proračunu energetske potrebe se zanemaruje otpor uspona.



Slika 18. Skica otpora vožnje

4.2.1. Sila otpora zraka

Gibanjem vozila kroz zrak dolazi do gubitaka energije te se kao posljedica toga javlja sila otpora zraka (F_z). Na iznos sile otpora zraka utječu: čelna površina vozila (A), koeficijent otpora zraka (c_w), gustoća zraka (ρ_z) i brzina vozila (v). Računa se prema sljedećoj jednadžbi [12]:

$$F_z = \rho_z \cdot \frac{v^2}{2} \cdot c_w \cdot A. \quad (4.1)$$

Koeficijent otpora zraka (c_w) za autobuse se kreće u rasponu od 0,35 do 0,55 [13]. Za gradski autobus proučavan u ovom radu uzima se vrijednost 0,45. Čelna površina vozila (A) iznosi $6,65 \text{ m}^2$. Gustoća zraka (ρ_z) iznosi $1,204 \text{ kg/m}^3$ za standardne atmosferske uvjete (tlak zraka 101325 kPa i temperatura $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Brzina (v) je zadana za svaki trenutak ispitnog voznog ciklusa.

4.2.2. Sila otpora kotrljanja

Sila otpora kotrljanja se javlja uslijed konstantnog deformiranja gume kotača prilikom kotrljanja po podlozi. Proporcionalna je masi vozila te je približno konstantne vrijednosti. Također, povećanjem uspona (s), sila otpora kotrljanja se smanjuje, no kod standardnih ispitnih voznih ciklusa se ne uzima u obzir uspon. Sila otpora kotrljanja računa se prema sljedećoj jednadžbi [12]:

$$F_k = f_k \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha. \quad (4.2)$$

Uspón ceste (s) se najčešće zadaje u postocima, a za proračun sila otpora je potreban nagib ceste u stupnjevima (α). Nagib u stupnjevima se računa prema jednadžbi:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{s}{100} \quad (4.3)$$

Faktor otpora kotrljanja (f_k) ovisi o vrsti gume i vrsti podloge. Za gume teretnih vozila na asfaltu kreće se od 0,006 do 0,01 [12]. Za gradski autobus koji se proučava u ovom radu uzima se vrijednost 0,008. Ubrzanje sile teže (g) iznosi $9,81 \text{ m/s}^2$.

4.2.3. Sila otpora uspona

Iznos sile otpora uspona ovisi o ukupnoj masi vozila i nagibu podloge. Računa se prema jednadžbi [12]:

$$F_u = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha. \quad (4.4)$$

4.2.4. Sila otpora ubrzanja

Sila otpora ubrzanja posljedica je inercijskih sila prilikom ubrzavanja vozila. Na njezin iznos utječu masa vozila (m_v) i translatorno ubrzanje vozila (a). Računa se prema jednadžbi [12]:

$$F_a = m_v \cdot a. \quad (4.5)$$

Za izračun sile otpora ubrzanja još nedostaje iznos ubrzanja (a). Ubrzanje u svakom trenutku ispitnog voznog ciklusa se izračunava iz zadanih vrijednosti brzine u ovisnosti o proteklom vremenu.

4.2.5. Vučna sila, potrebna snaga i moment na kotačima

Iznos vučne sile (F_v) potrebne za pogon vozila slijedi iz jednadžbe:

$$F_v = F_z + F_k + F_u + F_a \quad (4.6)$$

Snaga potrebna na kotačima za pogon vozila računa se prema jednadžbi:

$$P_{kot} = F_v \cdot v \quad (4.7)$$

Pogonski moment potreban na kotačima se računa prema jednadžbi:

$$M_p = F_v \cdot r_{din} \quad (4.8)$$

4.3. Potrebna snaga elektromotra

Proučavaju se 2 kriterija na temelju kojih će se proračunati potrebna snaga elektromotora (P_{EM}):

- kriterij najvećeg uspona koji autobus mora moći svladati,
- kriterij najveće brzine kojom autobus mora moći voziti.

Kada je poznata snaga potrebna na kotačima, jednostavno se izračuna potrebna snaga elektromotora. S obzirom da se snaga od elektromotora odvodi na kotače preko diferencijala i pogonskih vratila u kojima se javljaju gubici, uvodi se mehanički stupanj djelovanja pogonskog sustava (η_m). Snaga se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$P_{EM} = \frac{P_{kot}}{\eta_m}. \quad (4.9)$$

Mehanički stupanj djelovanja (η_m) za ovaj slučaj iznosi 0,96.

4.3.1. Najveći uspon

Za kriterij najvećeg uspona (s) uzima se iznos od 12 %, što je najveći uspon koji se javlja na rutama gradskih autobusa u Zagrebu. Također, autobus mora biti u stanju održavati razumnu brzinu na takvom usponu, te se za ove potrebe uzima brzina od 25 km/h. Sile otpora vožnje računaju se prema jednadžbama (4.1), (4.2) i (4.4). Zatim se izračuna potrebna vučna sila prema jednadžbi (4.6) i potrebna snaga na kotačima prema jednadžbi (4.7). Uz stupanj mehaničkog djelovanja $\eta_m = 0,96$, prema jednadžbi (4.9) dobije se potrebna snaga elektromotora, te ona iznosi $P_{EM} = 163$ kW. Moment potreban na kotačima se računa prema jednadžbi (4.9) te on iznosi $M_p = 10475$ Nm. Ovaj moment je približno konstantan za male brzine vožnje.

4.3.2. Najveća brzina

Za kriterij najveće ostvarive brzine uzima se brzina od 90 km/h. Kada se provede isti postupak proračuna kao za kriterij najvećeg uspona dobije se potrebna snaga elektromotora koja iznosi $P_{EM} = 66$ kW. Usporedbom ovih dviju vrijednosti snage elektromotora može se zaključiti da se elektromotor treba birati na temelju prvog kriterija.

4.4. Odabir elektromotora

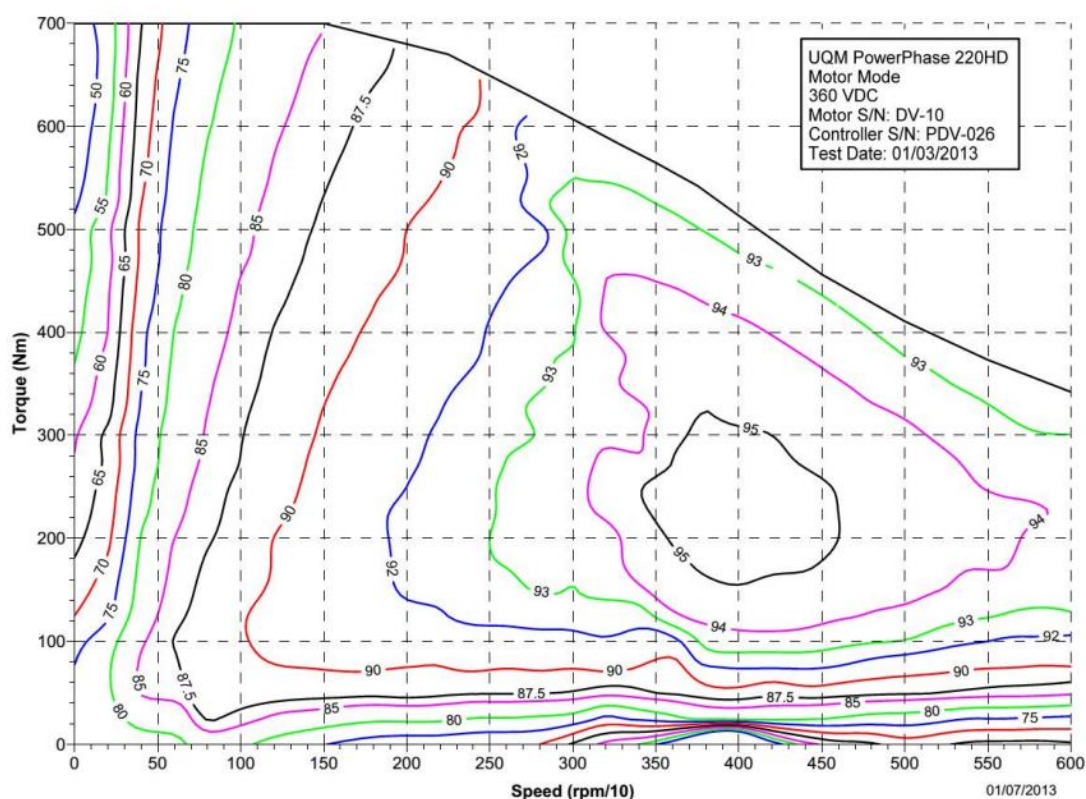
Na temelju izračunatih potrebnih snaga elektromotora može se zaključiti da motor treba imati minimalnu kontinuiranu snagu od 66 kW te minimalnu vršnu snagu od 163 kW. Na temelju tih podataka odabran je elektromotor PowerPhase HD 220 (slika 19) kojeg proizvodi tvrtka UQM. Radi se o motoru izmjenične struje s permanentnim magnetima. Karakteristike elektromotora su dane u tablici 10, a dijagram momenta u ovisnosti o brzini vrtnje prikazan je na slici 20.



Slika 19. UQM PowerPhase HD 220 [13]

Tablica 10. Karakteristike elektromotora [13]

Karakteristika	
Najveća brzina vrtnje	6000 min ⁻¹
Nazivna snaga	120 kW
Vršna snaga	220 kW
Nazivni moment	370 Nm
Vršni moment	700 Nm
Napon	375 V
Masa	123 kg



Slika 20. Momentna karakteristika elektromotora [13]

4.5. Transmisija

Autobus je opremljen diferencijalom prijenosnog omjera $i_{or} = 5,74$. S obzirom da elektromotor ostvaruje veće brzine vrtnje i manji moment u odnosu na Dieslov motor kojeg zamjenjuje, svakako će biti potrebno ugraditi i dodatni reduktor prijenosnog omjera i_m .

Ukupni prijenosni omjer (i_{uk}) tada se računa prema jednadžbi:

$$i_{uk} = i_{or} \cdot i_m \quad (4.10)$$

Najveći moment elektromotora iznosi $M_{EM,max} = 700$ Nm u rasponu brzine vrtnje od 0-1500 min^{-1} . Moment potreban na kotačima za slučaj najvećeg uspona iznosi $M_p = 10475$ Nm. Iz ovoga se može zaključiti da je potrebna transmisija s ukupnim prijenosnim omjerom koji se računa prema jednadžbi:

$$i_{uk} = \frac{M_p}{M_{EM,max} \cdot \eta_m} = 15,6. \quad (4.11)$$

Dobiveni prijenosni omjer je najmanji prijenosni omjer s kojim je još moguće svladati zahtijevani najveći uspon. Problem je što s ovim prijenosnim omjerom autobus nije u stanju

postići najveću traženu brzinu. Najveća brzina autobusa s ovim prijenosnim omjerom se računa prema jednadžbi:

$$v_{max} = \frac{n_{EM,max} \cdot \pi}{i_{uk} \cdot 30} \cdot r_{din} \cdot 3,6 = 67,4 \text{ km/h} \quad (4.12)$$

Najveća brzina vrtnje elektromotora ($n_{EM,max}$) iznosi 6000 min^{-1} . Nakon uvrštavanja svih vrijednosti i izračuna, dobije se $v_{max} = 67,4 \text{ km/h}$, što je znatno manje od zahtijevane brzine od 90 km/h . Iz ovoga se može zaključiti da bi se za postizanje brzine od 90 km/h morao smanjiti prijenosni omjer, no onda autobus više ne bi mogao svladati zahtijevani uspon od 12% . Na temelju ovoga zaključuje se da je u autobus potrebno ugraditi dvostupanjski mjenjač kako bi se zadovoljila oba kriterija.

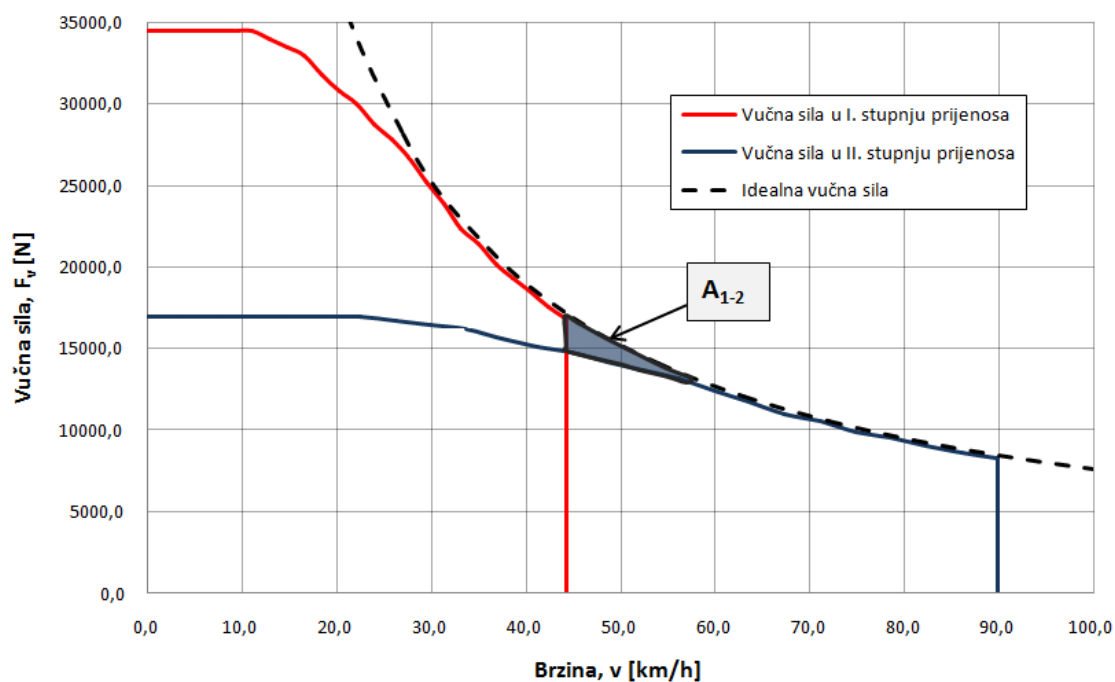
4.5.1. Prijenosni omjeri dvostupanjskog mjenjača

Prijenosni omjer drugog stupnja mjenjača ($i_{m,2}$) odabire se tako da vozilo može postići brzinu od 90 km/h i to pri najvećoj brzini vrtnje elektromotora $n_{EM,max} = 6000 \text{ min}^{-1}$, gdje motor još uvijek postiže vršnu snagu. Takvim odabirom prijenosnog omjera omogućuje se postizanje najveće zahtijevane brzine uz zadržavanje što boljih performansi autobusa. Prijenosni omjer drugog stupnja mjenjača računa se prema jednadžbi:

$$i_{m,2} = \frac{3,6 \cdot n_{EM,max} \cdot \pi}{30 \cdot i_{or} \cdot v} \cdot r_{din} = 2,04 \quad (4.13)$$

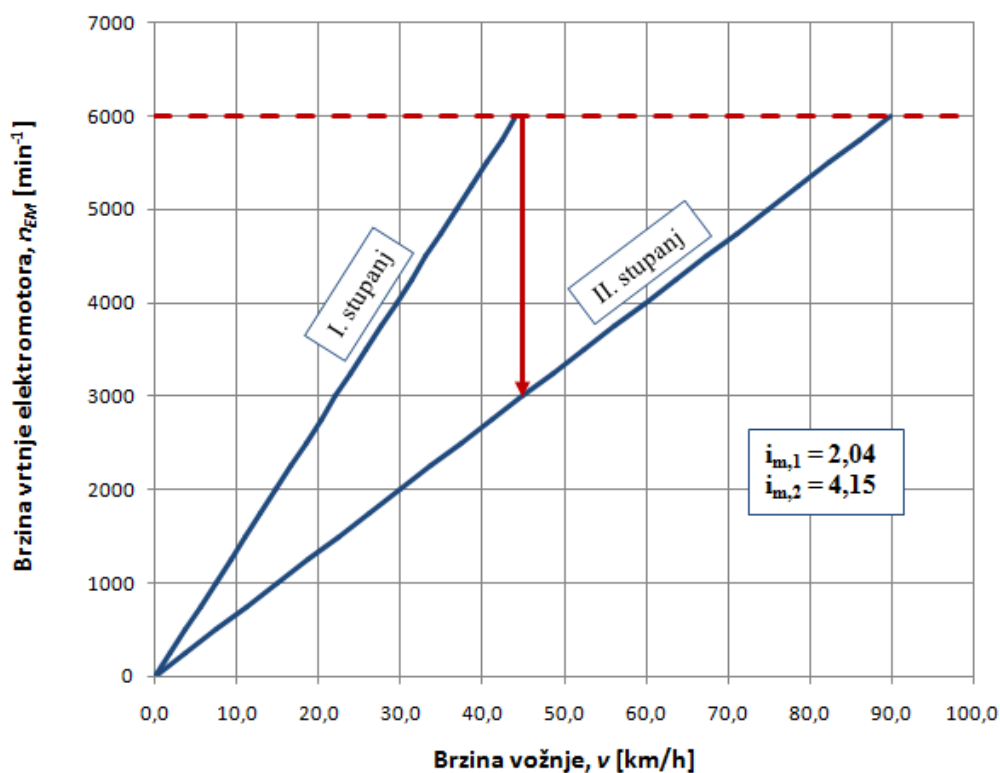
Prijenosni omjer prvog stupnja mjenjača ($i_{m,1}$) mora biti takav da vozilo mora moći svladati uspon od najmanje 12% te se prema jednadžbi (4.11) dobije $i_{uk} = 15,6$. Na temelju ukupnog prijenosnog omjera, prema jednadžbi (4.10), dobije se $i_{m,1} = 2,72$. S obzirom da se ugrađuje dvostupanjski mjenjač, nije nužno težiti što većoj ostvarivoj brzini u prvom stupnju, nego se prijenosni omjer prvog stupnja mjenjača odabire tako da se napravi kompromis između što boljih ubrzanja i mogućnosti svladavanja što većeg uspona. Također, teži se da vučna karakteristika bude što bliža idealnoj, odnosno teži se smanjenju površine A_{1-2} prikazane u vučnom dijagramu na slici 21. Nakon proračuna performansi s više različitih prijenosnih omjera, zaključuje se da je najpogodniji prijenosni omjer prvog stupnja mjenjača $i_{m,1} = 4,15$.

S ovako dimenzioniranim mjenjačem lako se ostvaruju tražene performanse te se omogućuje svladavanje uspona od čak 19% . Performanse autobusa s ovakvim pogonskim sustavom su detaljnije obrađene u šestom poglavlju.



Slika 21. Vučni dijagram s ucrtanom površinom A_{1-2}

Na slici 22 prikazan je pilasti dijagram mjenjača s ovako proračunatim prijenosnim omjerima. Pilasti dijagram prikazuje ovisnost brzine vožnje o brzini vrtnje motora za pojedini stupanj prijenosa.



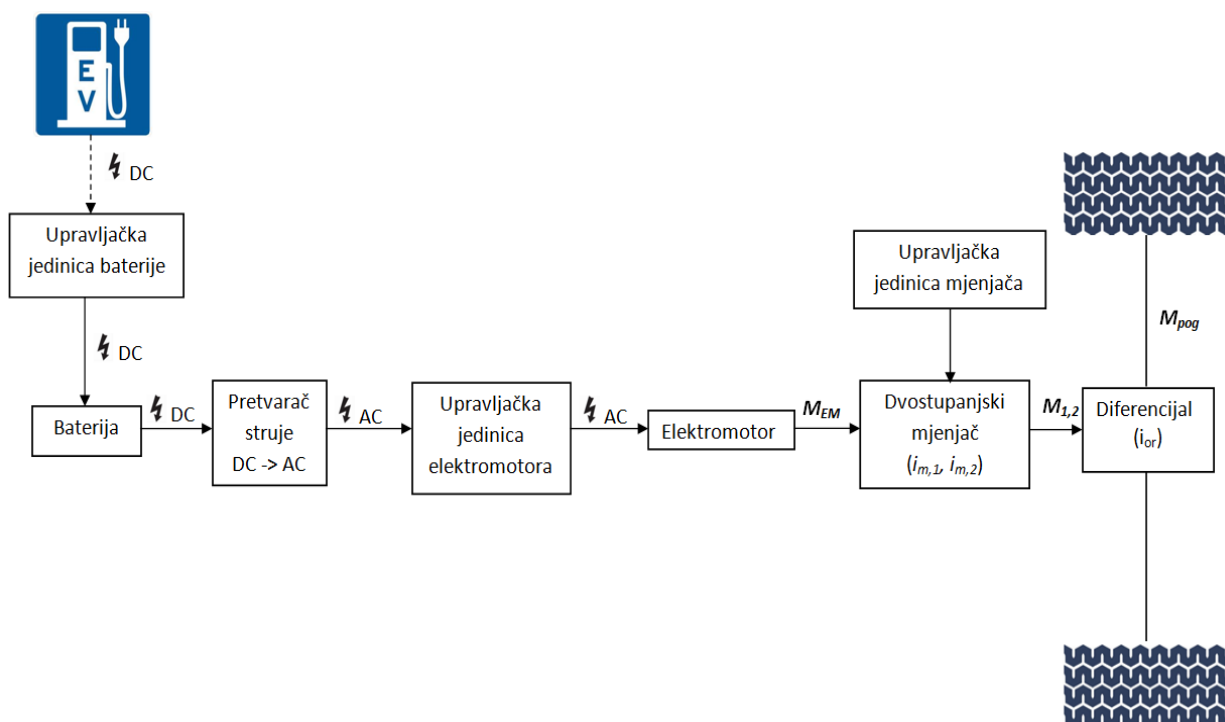
Slika 22. Pilasti dijagram mjenjača

4.6. Ostale elektroničke komponente

Kako bi cijeli sustav električnog pogona mogao funkcionirati, potrebne su još mnoge elektroničke komponente. Neke od važnijih komponenti su:

- Upravljačka jedinica baterije (BMS, engl. *Battery Managment System*) - upravlja punjenjem baterije
- Pretvarač istosmjerne struje (engl. *DC - Direct Current*) u izmjeničnu struju (engl. *AC - Alternating current*) - potreban jer se koristi elektromotor izmjenične struje, a baterija daje istosmjernu struju
- Upravljačka jedinica motora - kontrolira izlazni moment (M_{EM}) i brzinu vrtnje elektromotora (n_{EM})
- Upravljačka jedinica mjenjača - upravlja odabirom stupnja prijenosa

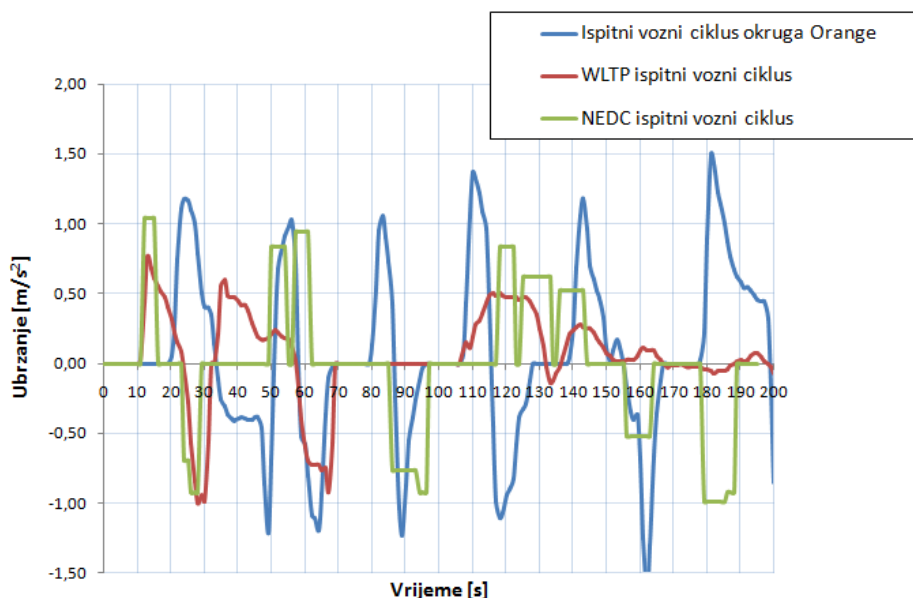
Shema električnog autobusa s važnijim komponentama prikazana je na slici 23.



Slika 23. Shema električnog autobusa

5. ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA BATERIJE

Potreban kapacitet baterije se određuje na temelju proračunatih energetske potrebe i potrebnog dometa autobusa. Također treba paziti i na masu baterije jer autobus ima određenu nosivost te se svakim povećanjem mase praznog vozila smanjuje putnički kapacitet. Energetske potrebe su izračunate za gradski dio NEDC i WLTP ciklusa te za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange (engl. *Orange County Bus Cycle*). S obzirom da su NEDC i WLTP ispitni vozni ciklusi namijenjeni osobnim vozilima i ne odražavaju dinamiku stvarne vožnje, pogotovo NEDC, nisu u potpunosti prikladni za ispitivanje gradskih autobusa te shodno tome ne daju realne rezultate. Ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange isključivo je namijenjen gradskim autobusima. Napravljen je prema realnim uvjetima s kojima se susreću autobusi u javnom gradskom prijevozu te stoga daje realnije rezultate potrošnje energije. Usporedba profila ubrzanja za prvih 200 sekundi ova tri ciklusa prikazana je dijagramom na slici 24. Iz dijagrama se može zaključiti da ispitni vozni ciklus okruga Orange ima najveća ubrzanja i usporenja te su ona nejednolika u odnosu na NEDC.



Slika 24. Usporedba profila ubrzanja proučavanih ispitnih voznih ciklusa

5.1. Određivanje energetske potrebe

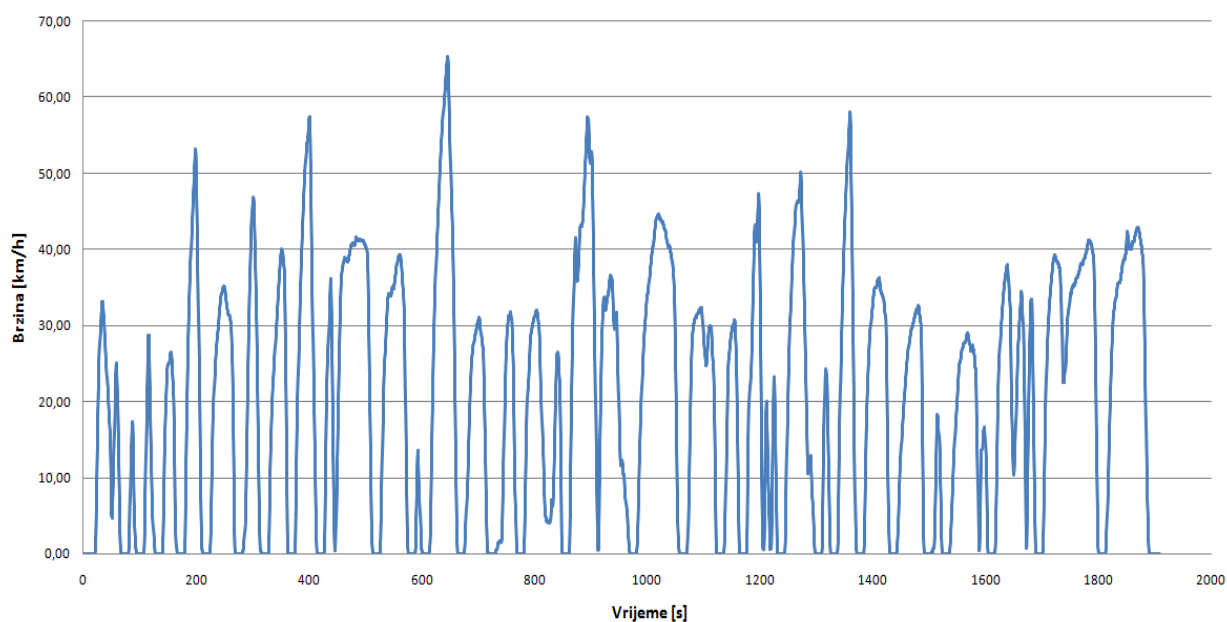
Energetske potrebe su izračunate pomoću programa *Microsoft Office Excel*. Za izračun su potrebne vrijednosti brzine u ovisnosti o proteklom vremenu te karakteristike autobusa

koje su dane u tablici 9. U proračunu se koriste jednačbe (4.1) - (4.8), ne uključujući jednačbu (4.4) s obzirom da se u ispitnim voznim ciklusima ne uzima u obzir promjena nadmorske visine, odnosno uspon. Za faktor iskoristivosti pretvorbe energije od baterije do kotača uzima se vrijednost 0,7. Također, električni pogonski sustav ima mogućnost regenerativnog kočenja te se za faktor iskoristivosti pretvorbe energije od kotača do baterije uzima vrijednost 0,5. Na slici 25 je prikazan primjer tablice za proračun energetske potrebe u programu *Microsoft Office Excel*.

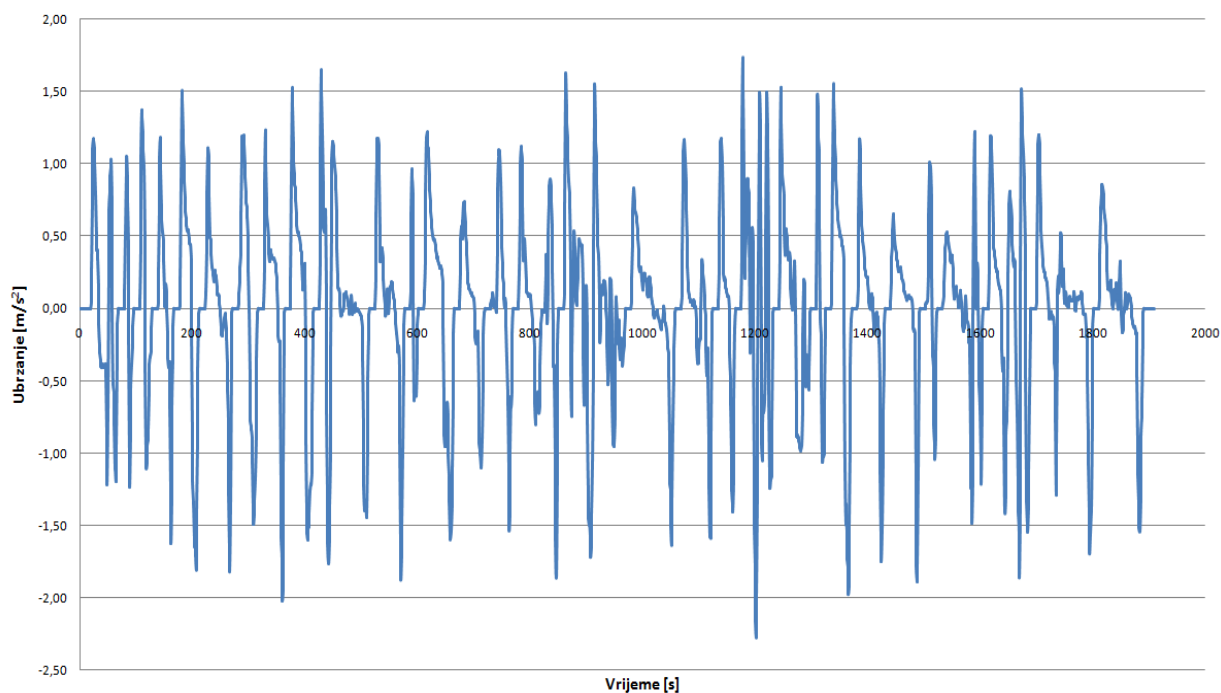
Ukupno proteklo vrijeme	Brzina	Ubrzanje	Prijeđeni put vozila	F_k	F_z	F_g	F_V	P_V	Energija	Regenerirana Energija
[s]	[km/h]	[m/s ²]	[m]	[N]	[N]	[N]	[N]	[kW]	[kWh]	[kWh]
0	0,00	0,00	0,00	1412,64	0,00	0,00	1412,64	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	1412,64	0,00	0,00	1412,64	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	1412,64	0,00	0,00	1412,64	0,00	0,00	0,00
...
...
26	18,35	1,10	11,23	1412,64	39,26	20826,92	22278,82	113,54	0,03	0,00
27	22,11	1,00	16,87	1412,64	57,03	18968,13	20437,80	125,54	0,03	0,00
28	25,57	0,79	23,52	1412,64	76,28	14870,34	16359,25	116,21	0,03	0,00
...
...
1888	1,72	-0,62	10526,02	1412,64	0,35	-11701,94	-10288,96	-4,92	0,00	-0,0014
1889	0,21	-0,24	10526,19	1412,64	0,01	-4520,24	-3107,60	-0,18	0,00	-0,0001
1890	0,00	-0,03	10526,13	1412,64	0,00	-549,19	863,45	0,00	0,00	0,0000

Slika 25. Primjer tablice za proračun energetske potrebe

Dobiveni profil brzina za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange prikazan je dijagramom na slici 26, a profil ubrzanja na slici 27.

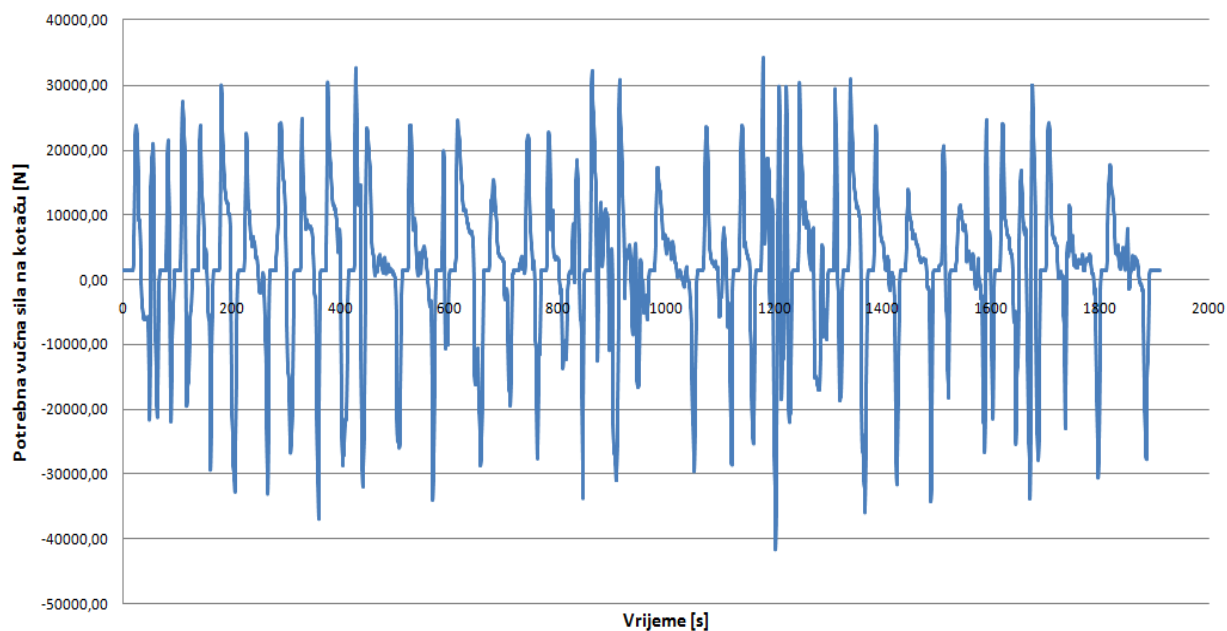


Slika 26. Dijagram profila brzine za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange

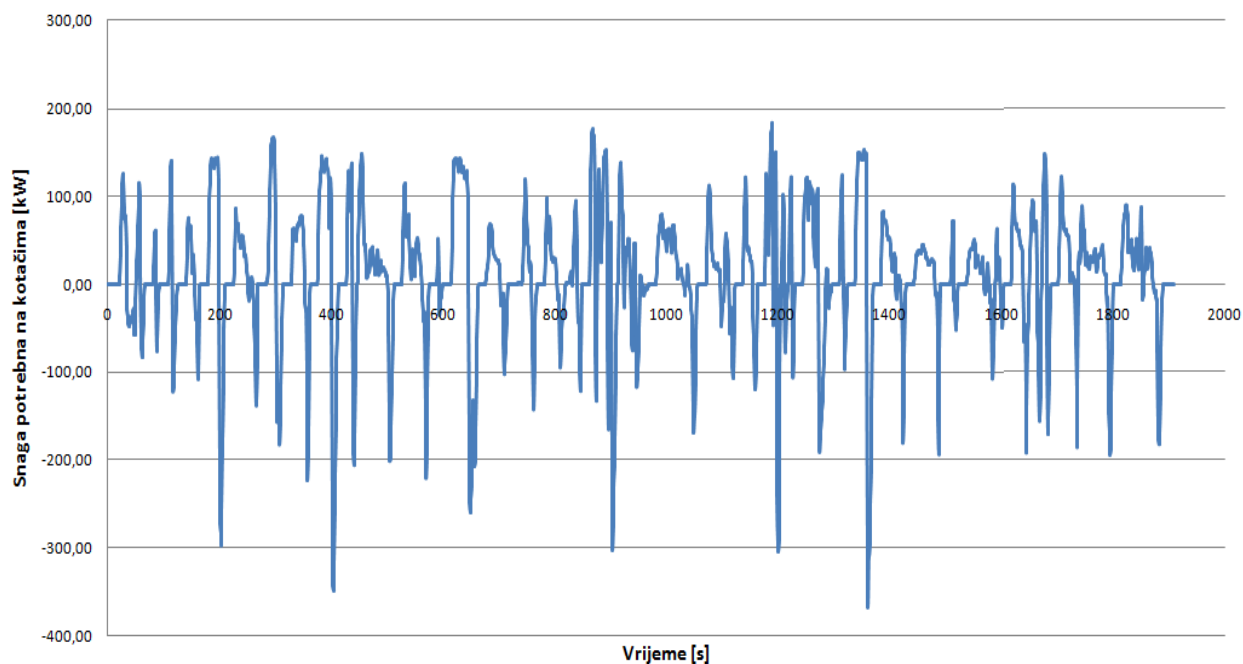


Slika 27. Dijagram profila ubrzanja za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange

Profil vučne sile potrebne na kotačima prikazan je dijagramom na slici 28, a profil snage dijagramom na slici 29.

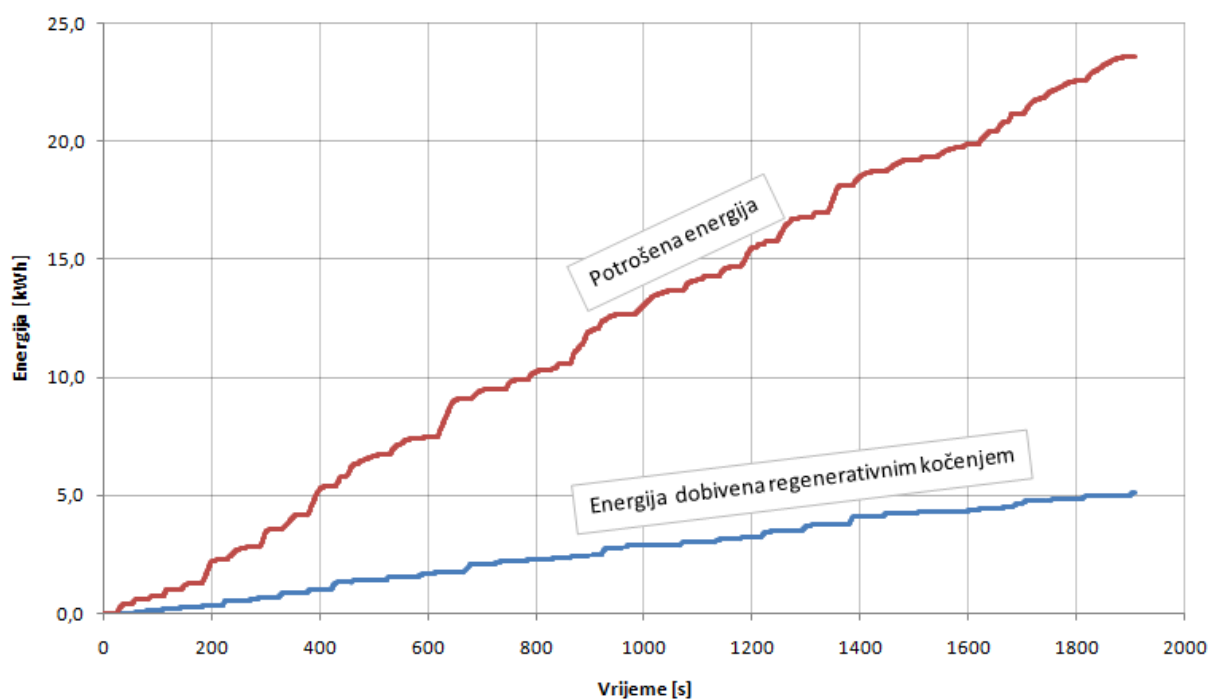


Slika 28. Profil potrebne vučne sile na kotačima za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange



Slika 29. Profil potrebne snage na kotačima za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange

Kumulativ potrošene energije i energije dobivene regenerativnim kočenjem prikazan je dijagramom na slici 30. Iz dijagrama se vidi da je količina potrošene energije znatno veća od regenerirane te se ta razlika mora nadomjestiti energijom iz baterije.



Slika 30. Kumulativ energije za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange

Nakon izvršenog proračuna dobije se potrošnja energije za ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange. Radi usporedbe izračunata je i potrošnja energije za NEDC i WLTP ispitne vozne cikluse. Usporedba potrošnje energije za ova tri ispitna vozna ciklusa dana je u tablici 11.

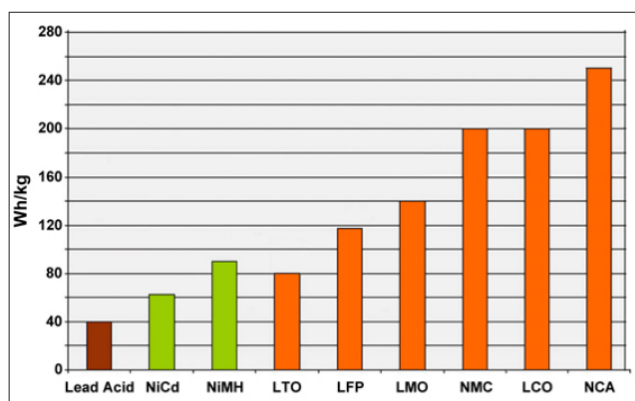
Tablica 11. Usporedba potrošnje energije

	Potrošnja energije [kWh/km]
Ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange	1,75
NEDC ispitni vozni ciklus	1,43
WLTP ispitni vozni ciklus	1,13

Na temelju usporedbe može se zaključiti da je ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange najzahtjevniji u pogledu potrošnje energije što je bilo i za očekivati s obzirom da najrealnije prikazuje način vožnje gradskih autobusa (česta usporavanja i ubrzavanja). Zbog toga se za određivanje karakteristika baterije uzima potrošnja energije dobivena za ispitni vozni ciklus okruga Orange te ona iznosi 1,75 kWh/km. S obzirom da se u ovom ciklusu ne uzima u obzir promjena nadmorske visine, niti ovaj ciklus ne daje u potpunosti realne rezultate te je potrošnja energije u realnim gradskim uvjetima još veća.

5.2. Vrste baterija

Za električna vozila najčešće se koriste Li-Ion baterije zbog velike gustoće energije. Postoje različite tehnologije izvedbe Li-Ion baterija, a najprikladnija za vozila je litij-željezo-fosfatna (LiFePO_4). Gustoća energije za ovu bateriju iznosi 120 Wh/kg. Iako nema najveću gustoću energije, vrlo je trajna i pouzdana te daje najstabilniji napon. Usporedba gustoća energije za različite vrste Li-Ion baterija prikazana je na slici 31.



Slika 31. Usporedba gustoća energije za različite vrste baterije [15]

5.3. Određivanje dometa autobusa

Potreban domet autobusa je određen na primjeru linije 109 zagrebačkog gradskog autobusa. Ruta je dugačka 10,6 km, a vremenski, u prosjeku, autobusu treba 30 minuta kako bi prošao tu rutu. Ako se tome doda prosječno vrijeme stajanja autobusa na krajnjoj stanici od 10 minuta, ukupno trajanje rute u jednom smjeru iznosi 40 minuta. Autobusi na ovoj liniji voze 18 sati i 30 minuta u jednom danu, što znači da autobus prođe rutu otprilike 28 puta, a to daje prijedeni put od 300 km u danu. Kako bi autobus s električnim pogonom mogao voziti 18 sati i 30 minuta bez nadopunjavanja, potrebna mu je vrlo velika baterija čija bi masa iznosila približno 5000 kg te bi tada putnički kapacitet autobusa bio znatno smanjen.

Za električni autobus u ovom radu uzima se da mora voziti 8 sati bez nadopunjavanja, pa potrebni domet tada iznosi:

$$\frac{8 \cdot 60}{40} \cdot 10,6 = 127,2 \text{ km.} \quad (5.1)$$

Također treba uračunati i put do spremišta za autobuse, pa traženi domet iznosi približno 150 km.

Na temelju toga se izračuna potrebni kapacitet baterije uzimajući u obzir potrošnju energije dobivenu analizom energetske potrebe:

$$150 \cdot 1,75 = 263 \text{ kWh.} \quad (5.2)$$

Gustoća energije baterije iznosi 0,12 kWh/kg, što znači da će masa baterije iznositi:

$$263 \div 0,12 = 2192 \text{ kg.} \quad (5.3)$$

5.4. Masa autobusa s električnim pogonom

Prije ugradnje električnog pogona potrebno je ukloniti Dieslov motor, automatski mjenjač i spremnik s gorivom. Zatim je potrebno ugraditi komponente električnog pogona: elektromotor, dvostupanjski mjenjač, bateriju, punjač, strujni pretvarač i druge prateće elektroničke komponente. Izračun mase autobusa s električnim pogonom prikazan je u tablici 12. Na temelju dobivene mase može se zaključiti da se masa praznog autobusa povećala za 631 kg. Zbog ograničene nosivosti autobusa, svako povećanje mase praznog vozila rezultira smanjenjem putničkog kapaciteta. Ako se uzme da je prosječna masa putnika 75 kg, putnički kapacitet promatranog autobusa se smanjio za 8 putnika, što je prihvatljivo ako se uzme u obzir da se time dobije domet veći za 42 km.

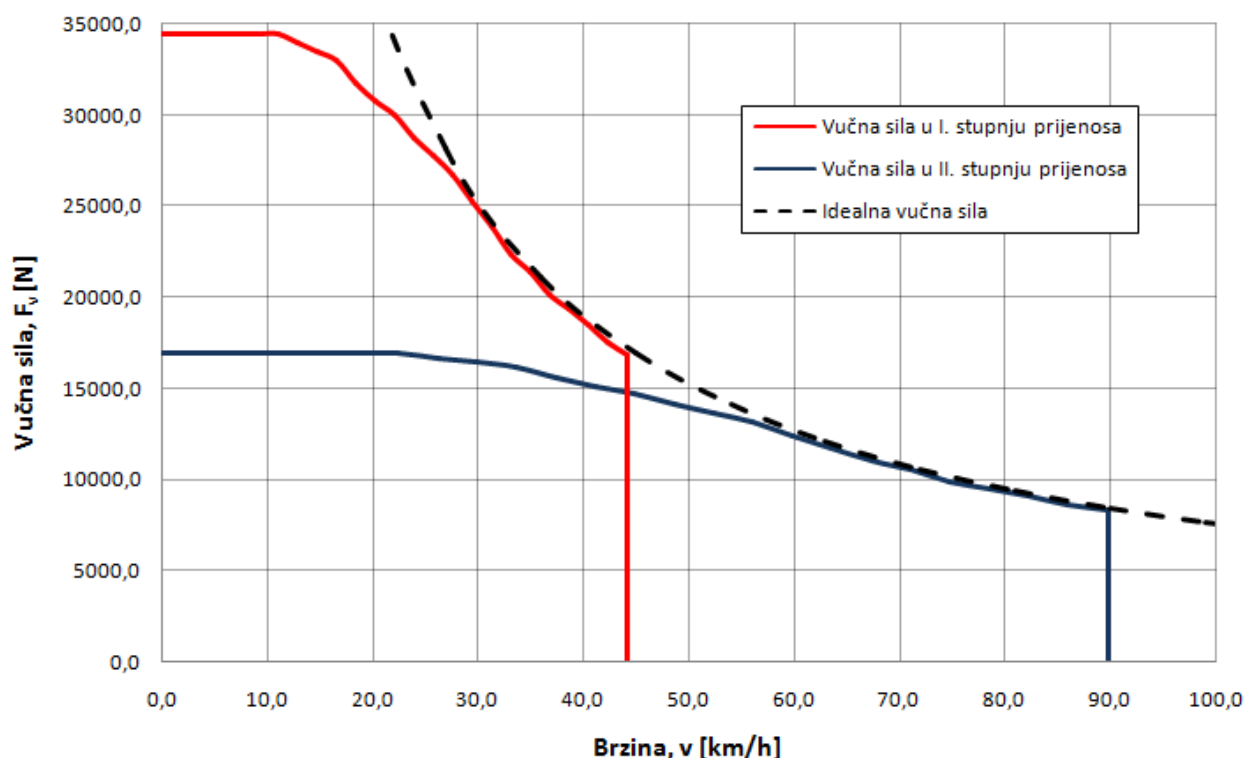
Tablica 12. Masa autobusa s električnim pogonom

	Masa
Masa autobusa s Diesellovim motorom	12000 kg
Komponente koje se uklanjaju:	
Dieselov motor	-1100 kg
Automatski mjenjač	-350 kg
Spremnik + gorivo	-250 kg
	= 10300 kg
Komponente koje se ugrađuju:	
Elektromotor	+83 kg
Dvostupanjski mjenjač	+56 kg
LiFePO ₄ baterija kapaciteta 263 kWh	+2192 kg
Masa autobusa s električnim pogonom	= 12631 kg

6. PRORAČUN PERFORMANSI ELEKTRIČNOG AUTOBUSA

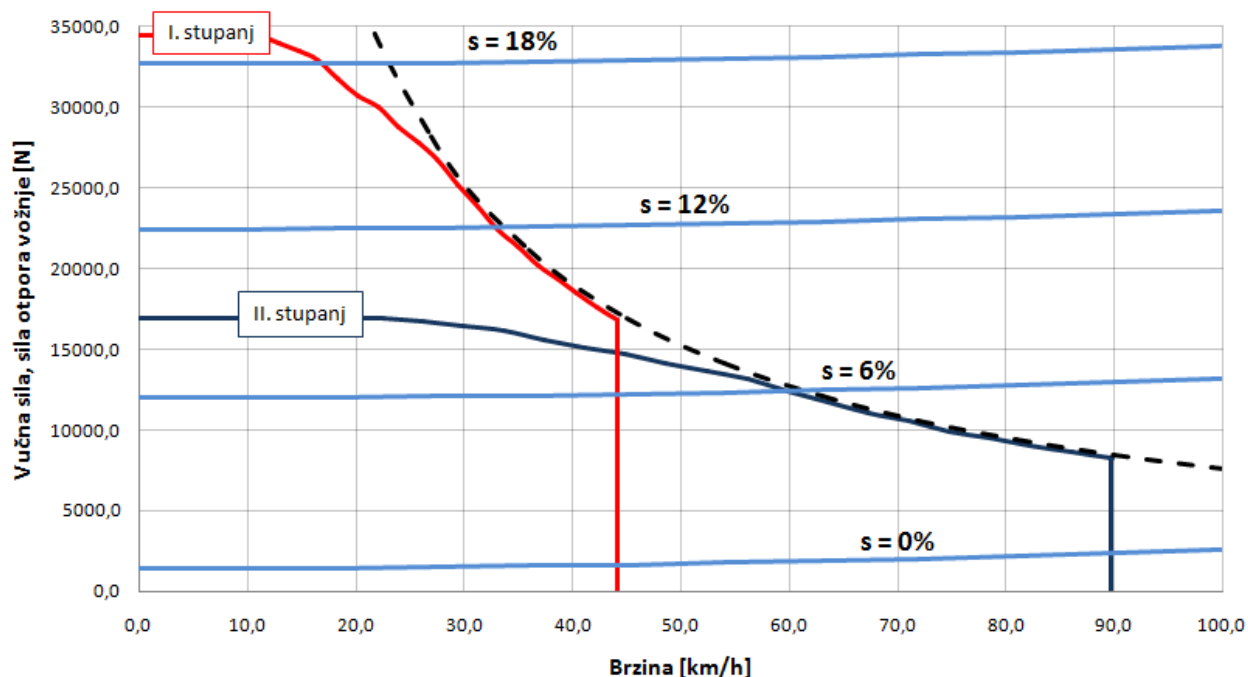
Performanse autobusa s električnim pogonom su, kao i energetske potrebe, izračunate pomoću programa *Microsoft Office Excel*. Za proračun je potrebno poznavati izraze za otpore vožnje koji su određeni jednadžbama (4.1) - (4.9). Također je potrebno poznavati i karakteristike autobusa i električnog pogona (elektromotora, dvostupanjskog mjenjača i diferencijala). U proračunu se uzima da je ukupna masa autobusa 18000 kg, to jest najveća dopuštena masa autobusa. To je najgori slučaj koji se povremeno javlja, pa ako električni pogon daje zadovoljavajuće performanse u ovom slučaju, sa smanjenjem mase će se performanse samo dodatno poboljšavati. Također je dana i usporedba performansi za puni autobus, polupun autobus ($m_v = 15315$ kg) i prazan autobus ($m_v = 12631$ kg).

Performanse relevantne za gradske autobuse su: mogućnost svladavanja uspona i ubrzanje te su one i prikazane u ovom poglavlju. Vučni dijagram autobusa s električnim pogonom je prikazan na slici 32.



Slika 32. Vučni dijagram autobusa s električnim pogonom

Vučni dijagram s ucrtanim otporima vožnje za najveću masu autobusa ($m_{v,max}$) i za različite vrijednosti uspona (s) prikazan je na slici 33.



Slika 33. Vučni dijagram s ucrtanim otporima vožnje

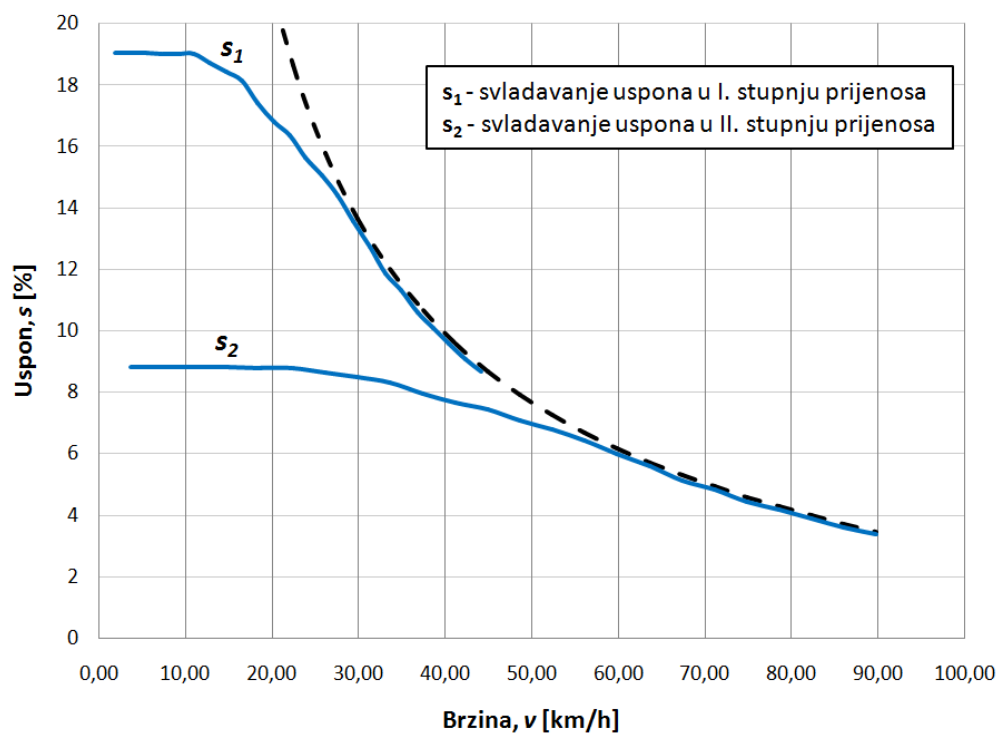
6.1. Mogućnost svladavanja uspona

Mogućnost svladavanja uspona u ovisnosti o brzini vožnje i stupnju prijenosa prikazana je dijagramom na slici 34.

Traženi najveći uspon koji autobus treba moći svladati održavajući brzinu od 25 km/h iznosi 12 %, a kao što se vidi iz dijagrama, autobus ima mogućnost svladavanja uspona od čak 18 % i više, uz nešto nižu brzinu. Ovaj dijagram vrijedi za najveću dopuštenu masu autobusa. Usporedba najvećih mogućih uspona koje autobus može svladati u ovisnosti o popunjenosti, odnosno masi autobusa, dana je u tablici 13.

Tablica 13. Najveći mogući uspon u ovisnosti o popunjenosti autobusa

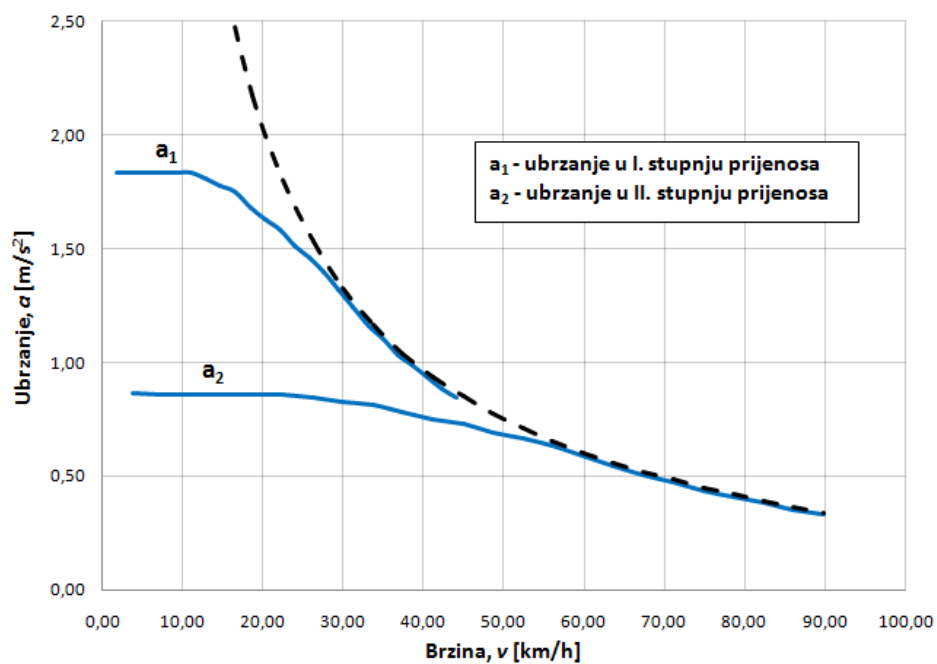
Popunjenost autobusa	Masa autobusa [m_v]	Najveći uspon
Pun	18000 kg	19 %
Polupun	15315 kg	22,7 %
Prazan	12631 kg	28 %



Slika 34. Mogućnost svladavanja uspona

6.2. Ubrzanje

Ubrzanje autobusa u ovisnosti o brzini vožnje i stupnju prijenosa prikazano je dijagramom na slici 35.



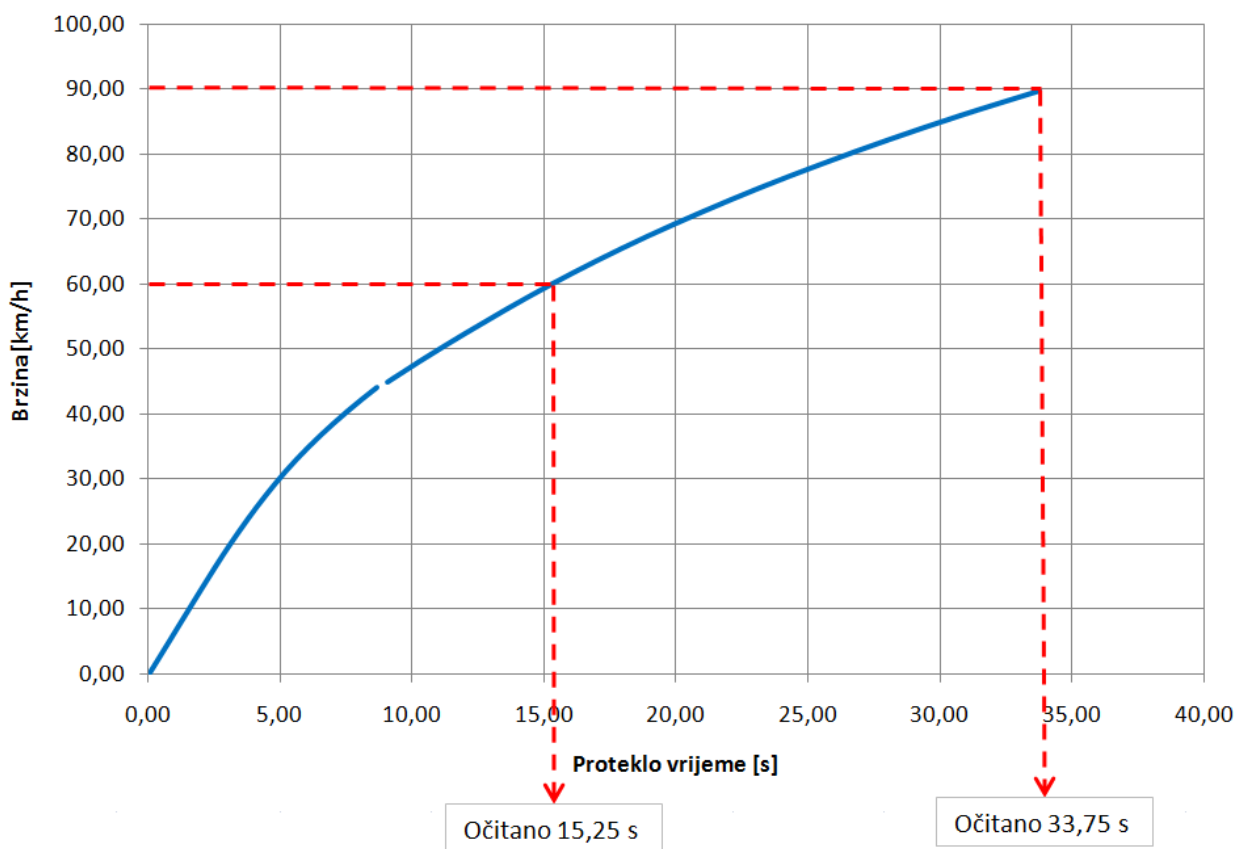
Slika 35. Ubrzanje u ovisnosti o brzini i stupnju prijenosa

Ubrzanje autobusa je bolje prikazati kao najmanje potrebno vrijeme za ubrzanje od 0 do 60 km/h i od 0 do 90 km/h. Ta vremena se mogu očitati iz dijagrama ovisnosti brzine vožnje o proteklom vremenu prikazanom na slici 36.

Također, kao i kod uspona, napravljena je usporedba ubrzanja u ovisnosti o popunjenosti, odnosno masi autobusa, i dana je u tablici 14.

Tablica 14. Usporedba ubrzanja u ovisnosti o popunjenosti autobusa

Popunjenost autobusa	Masa autobusa [m_v]	Ubrzanje 0-60 km/h	Ubrzanje 0-90 km/h
Pun	18000 kg	15,25 s	33,75 s
Polupun	15315 kg	12,9 s	28,2 s
Prazan	12614 kg	10,55 s	22,85 s



Slika 36. Ovisnost brzine vožnje o proteklom vremenu

7. ANALIZA UŠTEDE U EKSPLOATACIJI

U ovome poglavlju napravljena je analiza očekivane uštede na temelju razlike u cijeni i potrošnji energenata te razlike u cijeni održavanja. U slučaju električnog pogona, kao energent se koristi električna energija, a u slučaju autobusa s Diesellovim motorom energent je dizelsko gorivo.

U Hrvatskoj se primjenjuje dvotarifni sistem naplate potrošnje električne energije. U razdoblju od 8:00 do 22:00 naplaćuje se cijena po višoj tarifi (VT), a u noćnim satima (22:00 - 8:00) naplaćuje se cijena po nižoj tarifi (NT). Za poduzetništvo, cijena 1 kWh električne energije po višoj tarifi iznosi 0,35 kn, a po nižoj tarifi 0,17 kn (20.2.2017.) [16].

Svaka komponenta u lancu od električne mreže do baterije ima određene gubitke. Korisnost punjača se procjenjuje na 95 % te se zatim ta energija skladišti u bateriji s otprilike 80 % korisnosti. Na temelju ovih podataka procjenjuje se da je faktor iskoristivosti od električne mreže do baterije otprilike 0,76. Kapacitet baterije autobusa proučavanog u ovom radu iznosi 263 kWh, no zbog spomenutih gubitaka potrebno je zapravo utrošiti 346 kWh energije kako bi se baterija napunila do punog kapaciteta i omogućila domet autobusa od 150 km. S obzirom da će se električni autobus puniti tijekom noći, uzima se cijena električne energije po nižoj tarifi te se dobije da cijena jednog punjenja iznosi 58,82 kn, a ako se to podijeli s proračunatim dometom dobije se 0,39 kn/km.

Procjenjuje se da je prosječna potrošnja goriva autobusa s Diesellovim motorom u gradskom prometu 40 l/100 km. Cijena dizelskog goriva iznosi 8,88 kn/l (20.2.2017.) [17]. Kada se to preračuna dobije se iznos od 3,55 kn/km.

Ušteda se računa na godišnjoj razini. Treba uzeti u obzir da autobus proučavan u ovom radu može odvesti najviše 150 km u jednom danu. Ako se pretpostavi da će autobus voziti svaki dan u godini, dobije se da autobus godišnje prijeđe 54.750 km. Radi usporedbe se i za autobus s Diesellovim motorom uzima da prijeđe isti put u godinu dana, iako u stvarnosti prijeđe više. Izračun uštede prikazan je u tablici 15. Iz tablice se može zaključiti da je cijena energenta koju električni autobus potroši u godinu dana otprilike 9 puta manja u odnosu na autobus s Diesellovim motorom, odnosno ušteda na energentu u godini dana iznosi 173.000 kn.

Također treba uzeti u obzir da je električni autobus jeftiniji za održavanje s obzirom da je električni pogonski sustav jednostavniji od pogonskog sustava s Diesellovim motorom i ima znatno manje komponenta koje zahtijevaju redovno održavanje. Prema [18] cijena održavanja autobusa s Diesellovim motorom iznosi 1,93 kn/km (0,26 €/km), dok je cijena održavanja električnog autobusa 30 % manja te iznosi 1,35 kn/km. Na godišnjoj razini ušteda na održavanju iznosi 31.755 kn.

Ukupna ušteda na troškovima eksploatacije u godini dana iznosi 204.765 kn. Prema nekim procjenama cijena elektrifikacije autobusa iznosi 1-1,2 milijuna kuna, što znači da je vrijeme potrebno za povrat investicije otprilike 5-6 godina.

Tablica 15. Usporedba cijene i potrošnje energenta te cijene održavanja za električni autobus i autobus s Diesellovim motorom

	Električni autobus	Autobus s Diesellovim motorom	Jedinica
Prijeđeni put u godinu dana	54.750	54.750	km
Cijena električne energije	0,17	-	kn/kWh
Cijena dizelskog goriva	-	8,88	kn/l
Cijena potrošenog energenta po kilometru	0,39	3,55	kn/km
Cijena potrošenog energenta u godini dana	21.352,5	194.362,5	kn
Cijena održavanja po kilometru	1,35	1,93	kn/km
Cijena održavanja u godini dana	73.912,5	105.667,5	kn
Ukupni troškovi eksploatacije u godini dana	95.265	300.030	kn

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana je elektrifikacija autobusa MAN NL 313 (A21, Lion's City) koji se koristi u gradskom prijevozu u Zagrebu. Cilj je pri tome dijelove postojećeg pogonskog sustava s Dieselovim motorom zamijeniti komponentama električnog pogona čije su karakteristike određene na temelju zahtijevanih performansi. Na temelju zahtjeva vezano za najveću brzinu i najveći uspon koji se može svladati dimenzioniran je pogonski motor, a na temelju ispitnog voznog ciklusa proračunate su energetske potrebe, odnosno potrebni kapacitet baterije.

Iz analize energetske potrebe može se zaključiti da najrealnije podatke o potrošnji energije daje ispitni vozni ciklus za autobuse okruga Orange, iako i ti rezultati znatno odstupaju od realnih gradskih ruta jer ne uključuje promjenu nadmorske visine. Također, može se zaključiti da električni autobus ne može prometovati 18 sati i 30 minuta, kao što je to slučaj s konvencionalnim autobusom pokretanim Dieselovim motorom jer bi masa baterije znatno utjecala na putnički kapacitet. Posljedično, zaključuje se da je realno vrijeme koje autobus provede u prometu 8 sati, kako bi se postigao kompromis između mase baterije i gubitka putničkog kapaciteta. Dobiven je potrebni kapacitet baterije od 263 kWh.

Proračunate performanse autobusa s električnim pogonskim sustavom su čak i bolje od zahtijevanih. Zahtijevano je da pun autobus mora moći svladati uspon od 12 % održavajući minimalnu brzinu od 25 km/h, a s ovako dimenzioniranim pogonskim sustavom može svladati uspon od čak 15,5 %.

Za kraj je napravljena i analiza uštede na troškovima eksploatacije električnog autobusa u odnosu na autobus s Dieselovim motorom. Izračunato je da ušteda iznosi otprilike 200.000 kn godišnje te bi svakako omogućila povrat investicije za vrijeme radnog vijeka električnog autobusa.

LITERATURA

- [1] "Urban buses: alternative powertrains for Europe"
http://www.fch.europa.eu/sites/default/files/20121029%20Urban%20buses%2C%20alternative%20powertrains%20for%20Europe%20-%20Final%20report_0_0.pdf
- [2] BYD K9
<http://www.byd.com/la/auto/ebus.html>
- [3] Solaris Urbino 12 Electric
<https://www.solarisbus.com/vehicle/urbino-12-electric>
- [4] Malgorzata Olszewska: "Trolley Roadmap Event, Brussels - Presentation", Solaris Bus & Coach, Bruxelles, 2013.
http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user_upload/download/TROLLEY_Workshop_Brussels/9_TROLLEY_Roadmap_Event_Brussels_Presentation_Olszewska_Solaris.pdf
- [5] Volvo 7900 Electric
<http://electric.volvobuses.com/>
- [6] ZF AVE 130
http://www.zf.com/corporate/en_de/products/product_range/buses/buses_axles_ave130_system.shtml
- [7] ZAwheel
<http://www.ziehl-abegg.com/gb/en/product-range/automotive/axle-drive-module/>
- [8] "Solaris Bus & Coach"
<https://brakar-no.s3.amazonaws.com/uploads/documents/166799ee-7d95-452a-a147-cfccb4559b9d.pdf>
- [9] T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae i P.G. Boulter: "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions", Velika Britanija, lipanj 2009.
- [10] Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_harmonized_Light_vehicles_Test_Procedure
- [11] Zagrebački Električni Tramvaj
<http://www.zet.hr/>
- [12] Lulić, Ormuž, Šagi: "Motorna vozila - predavanja", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015./2016.

-
- [13] Thomas Schütz: "Hucho - Aerodynamik des Automobils", 6. izdanje, München, 2013.
- [14] UQM PowerPhase HD 220
<https://www.neweagle.net/support/wiki/docs/Datasheets/UQM/PP220HD.pdf>
- [15] "Types of Lithium-Ion"
http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [16] HEP cijene električne energije
<http://www.hep.hr/ods/kupci-154/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-161/161>
- [17] INA cijene goriva
<http://www.ina.hr/trazilica-benzinskih-postaja/9763?benzid=361>
- [18] Lajunen, A.: "Evaluation of battery requirements for hybrid and electric city buses", Electric Vehicle Symposium (EVS26), Los Angeles, USA, 2012.

PRILOZI

I. CD-R disc